

Propuesta de montaje experimental para determinar la adherencia interfacial entre el concreto y la malla de fibra de fique natural

Jeisson Stiven Vargas Gamboa y Laura Isabel García Mantilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector

Valeria Laverde Sarmiento

Ing. Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de ingeniería civil

Ingeniería civil

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo de grado a nuestros queridos padres, quienes han sido una nuestra principal fuente de apoyo y motivación en todo momento. Su confianza en nosotros y su amor incondicional nos han impulsado a seguir adelante y lograr nuestros objetivos. Este logro es también suyo, por tal motivo queremos agradecerles su constante esfuerzo y dedicación en nuestra formación académica y personal.

Gracias por estar siempre presentes en nuestras vidas y por ayudarnos a crecer como personas y futuros profesionales.

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director y codirector del proyecto por su orientación y apoyo durante todo el proceso de elaboración de este trabajo de grado. Agradecemos especialmente su disposición a compartir sus conocimientos y experiencia con nosotros, lo cual nos ha permitido aprender y crecer como profesionales.

También queremos extender nuestro agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por proveernos de los recursos necesarios para llevar a cabo nuestro trabajo de manera eficiente y efectiva. Agradecemos el ambiente académico y de investigación que nos ha permitido desarrollar habilidades y adquirir conocimientos valiosos para nuestra formación.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
3. Revisión bibliográfica .....	16
3.1.Revisión de montajes .....	18
3.1.1. Ensayo de corte simple.....	18
3.1.2. Ensayo de corte doble .....	21
3.1.3. Extracción directa.....	23
3.1.4. Mixto.....	24
3.1.5. Flexión .....	25
4. Propuesta propia.....	26
4.1. Predimensionamiento .....	27
5. Diseño .....	30
5.1. Acople inferior.....	31
5.1.1. Resistencia del acero de un anclaje en tracción: .....	32
5.1.2. Resistencia al arrancamiento del concreto: .....	33
5.1.3. Resistencia a la extracción por deslizamiento:.....	35
5.2. Concreto a tensión .....	36
5.3. Longitud de adherencia efectiva del fique (Le).....	36
5.4. Acople superior .....	38

5.4.1. Elemento metálico.....	38
5.4.2. Dimensiones de la platina .....	41
6. Toma de datos .....	44
7. Análisis de costos.....	49
7.1. Cantidades .....	49
7.2. Presupuesto.....	51
8. Conclusiones .....	52
Referencias Bibliográficas .....	54
Apéndices.....	59

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Caracterización de documentos finales.....	17
Tabla 2. Predicción de longitudes de adherencia.....	20
Tabla 3. Dimensiones de probetas y mallas utilizadas por otros autores.....	28
Tabla 4. Longitud de la probeta .....	29
Tabla 5. Longitud sin lámina .....	29
Tabla 6. Longitudes de adherencia para mallas con y sin tratamiento .....	37
Tabla 7. Deformaciones y esfuerzos calculados .....	40
Tabla 8. Criterios de diseño de platina.....	41
Tabla 9. Resultados de espesores para la platina .....	43
Tabla 10. Materiales de fabricación de la probeta .....	50
Tabla 11. Cantidades para adherir la malla.....	51

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Montaje experimental a corte simple .....	19
Figura 2. Tipos de sujeción en la literatura.....	19
Figura 3. Montaje experimental a corte doble .....	22
Figura 4. Montaje experimental propuesto por (Mukhtar & Faysal, 2018).....	22
Figura 5. Montaje experimental de extracción directa.....	23
Figura 6. Montaje experimental de ensayo mixto.....	24
Figura 7. Montajes para prueba a flexión .....	25
Figura 8. Maquina universal de ensayos.....	26
Figura 9. Acople propuesto.....	26
Figura 10. Simulación vista perfil del modelo.....	27
Figura 11. Corte de sección para detalle del anclaje inferior.....	36
Figura 12. Elemento metálico .....	39
Figura 13. Dimensiones de platina.....	41
Figura 14. Modelo de membrana .....	42
Figura 15. Casos de carga sobre la platina.....	43
Figura 16. Dimensionamiento del montaje.....	44
Figura 17. Medidores de deformación. (F. Zhang, Wan, et al., 2021b).....	45
Figura 18. Transformadores diferenciales variables lineales (LVDT) .....	46
Figura 19. Medición de deformaciones con CID (GOM Correlate Pro_ Strains and Displacements from Motion Pictures, n.d.).....	47
Figura 20. Ubicación de patrones para CID.....	48

Figura 21. Dimensiones del acople superior..... 50

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A- Métodos experimentales para calcular longitud de adherencia.....	
Apéndice B- Predimensionamiento .....	
Apéndice C- Diseño .....	
Apéndice D- Toma de datos .....	
Apéndice E - Análisis de costos.....	

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

## Glosario

- 1. Adherencia:** es la capacidad de unión y resistencia entre dos materiales.
- 2. Carga:** es la fuerza aplicada sobre un elemento.
- 3. Concreto:** material compuesto por una mezcla de cemento, agregados (arena y grava), agua y, en ocasiones, aditivos.
- 4. Deformación:** es el cambio en la forma o dimensiones de un elemento debido a la aplicación de cargas.
- 5. Fibras de fique:** son hilos naturales obtenidos de la planta de Fique.
- 6. Interfaz:** es la superficie de contacto entre dos materiales.
- 7. Malla de fique:** red fabricada con fibras de fique tejidas o entrelazadas.
- 8. Porosidad:** es la presencia de espacios vacíos en una superficie.
- 9. Refuerzo:** es el uso de cualquier material o sistema para aumentar la resistencia y la capacidad de carga de una estructura.
- 10. Tensión:** es la fuerza interna que actúa sobre un material debido a las cargas aplicadas y causa deformaciones de elongación.

## Resumen

**Título:** Propuesta de montaje experimental para determinar la adherencia interfacial entre el concreto y la malla de fibra de fique natural \*

**Autor:** Jeisson Stiven Vargas Gamboa y Laura Isabel García Mantilla\*\*

**Palabras Clave:** Fibra vegetal, unión interfacial, montaje, reforzamiento, fique, concreto.

**Descripción:** Las estructuras de concreto están expuestas continuamente a diversos factores que debilitan y afectan su funcionamiento, por lo cual se utilizan métodos de refuerzo externo. Actualmente se estudia el uso de mallas de fibras vegetales, como las de fique, como reemplazo de los polímeros reforzados con fibras sintéticas (FRP), aprovechando sus ventajas económicas, ambientales y estructurales. Por lo tanto, en este trabajo se propuso un diseño experimental para el estudio de la adherencia entre la malla de fibra de fique y el concreto usando una resina epóxica. Para ello, se realizó una revisión literaria sobre las metodologías de ensayos con las que se evalúa la adherencia entre fibras vegetales o sintéticas y el concreto. A partir de la revisión, se predimensionó el montaje y se diseñó posteriormente teniendo en cuenta la normativa y las restricciones de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil. Algunos objetivos de diseño claves fueron el de garantizar la transferencia de esfuerzos entre los materiales, evitar fallas en la interfaz y capturar los datos de deformación mediante la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales. Finalmente, se presupuestaron los costos de fabricación y toma de datos, con un valor aproximado de \$260.000.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Ingeniería civil.

Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector: Valeria Laverde Sarmiento. Ing. Metalúrgica

### Abstract

**Title:** Experimental setup proposal to determine interfacial adhesion between concrete and fique fabric \*

**Author(s):** Jeisson Stiven Vargas Gamboa y Laura Isabel García Mantilla \*\*

**Key Words:** Vegetable fiber, interfacial bond, setup, strengthening, fique, concrete.

**Description:** Concrete structures are continuously exposed to various factors that weaken and affect their performance, which is why external reinforcement methods are used. Currently, the use of vegetable fiber fabrics, such as fique fibers, is being studied as a replacement for fiber-reinforced polymers (FRP), taking advantage of their economic, environmental, and structural benefits. Therefore, this work proposes a design of the experimental setup to study the bond behavior between fique fabric and concrete using an epoxy resin. A literature review was conducted on the testing methodologies used to assess the bond between vegetable or synthetic fibers and concrete. Based on the review, the setup was pre-dimensioned and subsequently designed, considering the Colombian regulations and the laboratory constraints of the School of Civil Engineering. Some key design objectives were to ensure the transfer of forces between the materials, prevent interface failures, and capture deformation data using digital image correlation techniques. Finally, the manufacturing and data collection costs were budgeted, with an approximate value of \$260,000.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering, Civil Engineering.

Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. in Civil and Environmental Engineering

Co-director: Valeria Laverde Sarmiento. Metallurgical Engineering

## Introducción

En la última década se ha estudiado el uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de estructuras de concreto debido a la pérdida de capacidad portante que tienen las estructuras por envejecimiento, efectos ambientales o aumento en las solicitaciones. Sin embargo, los FRP sintéticos presentan un alto costo en su fabricación, lo que a su vez genera un impacto ambiental debido al uso de productos químicos y una gran cantidad de energía, además no son biodegradables (Elbadry et al., 2000; Mivehchi & Varvani-Farahani, 2010). Por lo cual, ha surgido el uso de fibras vegetales como alternativa de refuerzo debido a su ligereza, sostenibilidad, bajo costo, fácil producción y mayor rango elástico; esto último permite un menor riesgo de fractura ante cargas extremas (Ganguly et al., 2022; Prakash et al., 2022).

Entre las principales fibras vegetales cultivadas en Colombia (algodón, fique, yute y lino, entre otras), se destaca el fique como una opción favorable de refuerzo debido a su moderada resistencia a la tracción y alargamiento antes de la rotura (Laverde et al., 2022). Sin embargo, para implementar este material como refuerzo externo de una estructura se debe garantizar la correcta adherencia entre la fibra y el concreto, con el fin de transferir los esfuerzos de un material a otro y evitar un desprendimiento prematuro.

Debido a esto, varios autores proponen diversos métodos de ensayo para medir la adherencia externa entre el concreto y diferentes fibras sintéticas y/o vegetales (Al-Tamimi et al., 2014; Gravina et al., 2014); no obstante, no existe una norma que estandarice la medición de dicha propiedad, y en algunos casos se requieren equipos especializados con lo que no cuenta la escuela de ingeniería civil (EIC) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). En este trabajo se busca identificar en la literatura los montajes experimentales utilizados o propuestos para evaluar la adherencia entre el concreto y mallas naturales o sintéticas, para posteriormente adaptar o proponer

un montaje experimental conocido a los equipos disponibles, en el cual se obtenga una curva de esfuerzo cortante versus desplazamientos relativos y se logre calcular tanto la adherencia entre los materiales a evaluar como la longitud mínima requerida para asegurar la transmisión de esfuerzos, de tal manera que, se evite el fallo de la interfaz de adherencia antes que el de la malla de fibra de fique. Finalmente, se plantea un análisis de costos de acuerdo con la fabricación y ejecución para el montaje experimental seleccionado.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Proponer un montaje experimental que permita determinar la relación esfuerzo promedio de adherencia versus desplazamiento relativo entre la malla de fique natural sin tratamientos químicos extraída del departamento de Santander (Colombia) y el concreto simple utilizando resina epóxica como adhesivo, teniendo en cuenta los equipos disponibles en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Identificar en la literatura los montajes experimentales utilizados o propuestos para evaluar la adherencia entre el concreto y mallas naturales o sintéticas.

Comparar diferentes alternativas de montaje experimental (existentes y propuestas) considerando los posibles modos de falla de los elementos y las restricciones del laboratorio de materiales de construcción de la EIC de la UIS.

Realizar un análisis de costos de acuerdo con la fabricación y ejecución para el montaje experimental seleccionado.

### 3. Revisión bibliográfica

Con el fin de identificar los montajes experimentales utilizados o propuestos en la literatura para evaluar la adherencia entre el concreto y mallas naturales o sintéticas se utilizó el motor de búsqueda Scopus bajo una cadena de búsqueda que abarque los temas de interés para la investigación. La construcción de la cadena de búsqueda inició con la selección de las siguientes palabras claves:

- "Test method"
- "Interfacial bond"
- Fiber
- Concrete
- Strengthen
- Pull-out
- "Set-up"

Respecto a estas se utilizó sinónimos para aumentar el rango de búsqueda en la base de datos mediante el operador "OR":

- "Test method" OR Model OR Test OR Experimental OR Study
- "Interfacial bond" OR Adhesive OR Adherence OR Epoxy OR Resine
- Fiber OR FRP
- Concrete
- Strengthen OR Reinforced
- "Pull-out" OR Tensile OR Shear OR Bending OR Tension
- "Set-up" OR "Single shear" OR Mixed OR Direct OR "Double shear"

Al utilizar el operador "AND" se generó la siguiente cadena de búsqueda con un total de 199 documentos encontrados con *TITLE-ABS-KEY*:

*("Test method" OR "Model test" OR "Experimental study") AND ("Interfacial bond" OR adhesive OR adherence OR resine) AND (fiber OR frp) AND (concrete) AND (strengthen OR reinforced) AND (pull-out OR shear OR bending OR tensile OR tension).*

Con el fin de reducir los documentos a un número razonable para su posterior revisión, se utilizó el operador "EXCLUDE" para excluir los parámetros de área de estudio que no hacen parte de "Engineering" y "Material Science", los documentos de tipo "Conference review", los años de publicación que sobrepasen los 10 años de antigüedad, y los idiomas diferentes al inglés y el español.

Al implementar estos filtros, se encontró un total de 100 documentos, los cuales fueron revisados y seleccionados de la siguiente manera: se examinó el resumen de cada documento para comprobar que su contenido abarcara información de interés para el desarrollo del diseño, como resultado se excluyeron 56 artículos y los restantes se revisaron completamente en busca de la descripción de los ensayos ejecutados y el diseño de los modelos. Luego de este paso, se obtuvo un total de 18 documentos, resumidos en la Tabla 1. Dentro de estos se encontró un artículo que recopila información de todas las pruebas de interés, por lo cual se tuvo en cuenta al hacer el conteo del número de documentos por ensayo.

**Tabla 1.**

*Caracterización de documentos finales*

<b>Ensayos</b>	<b>Número de documentos</b>	<b>%</b>
Cortante simple	7	30%
Flexión	9	39%
Cortante doble	4	17%
Extracción directa	2	9%
Mixto	1	4%

De acuerdo con la información encontrada y con los porcentajes correspondientes (Tabla 1), se observa que los ensayos más mencionados en la literatura son los ensayos a flexión y cortante doble; sin embargo, existe una variante del ensayo de cortante doble propuesta por (Mukhtar & Faysal, 2018) que permite la adaptación del ensayo y la simplificación del mismo mediante elementos desmontables.

Para seleccionar un ensayo con el cual se realizará el diseño se estudió cada uno de los montajes encontrados junto con su método de toma de datos para seleccionar el de mejor adaptabilidad a los equipos con lo que cuenta el laboratorio de ingeniería civil.

### **3.1. Revisión de montajes**

#### **3.1.1. *Ensayo de corte simple***

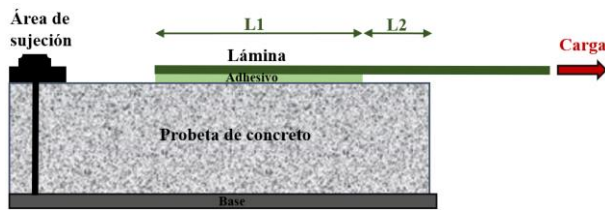
Es el más sencillo de todos los ensayos, y considerado como el más apto para estudiar el comportamiento de adherencia entre la interfaz FRP-concreto por autores como (Gravina et al., 2014), esto debido a que presenta uniformidad en los resultados obtenidos entre diferentes configuraciones de montaje. La prueba consiste en adherir una lámina sintética o vegetal a una probeta de concreto, y aplicar la carga de tracción directamente sobre la lámina (Figura 1); la longitud de adherencia (L1-Figura 1) debe ser suficiente para que el modo de falla de la interfaz concreto-lámina sea únicamente en cortante y no mixto, pues la fuerza de unión es proporcional a la altura del bloque de concreto, la cual restringe la longitud de adherencia (Mukhtar & Faysal, 2018).

Aunque la prueba puede realizarse en una máquina de ensayos universal (F. Zhang, Wan, et al., 2021a), dentro del diseño se requiere un sistema de sujeción para la probeta de concreto que

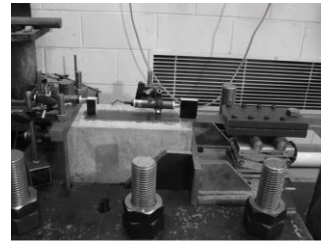
garantice la centralidad entre la carga aplicada y el soporte de la probeta (Figura 2); de igual manera se sugiere dejar una longitud libre entre la superficie adherida y el borde de la probeta en dirección de la aplicación de la carga (L2-Figura 1), para evitar el fallo de cuña.

### Figura 1.

*Montaje experimental a corte simple*



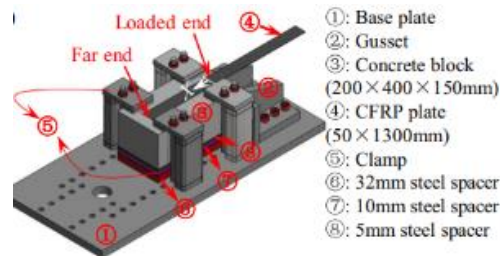
(a)



(b)(Gravina et al., 2014)

### Figura 2.

*Tipos de sujeción en la literatura*



(a) (Al-Saoudi et al., 2022)



(b) (Zhou et al., 2017)

De igual manera se pueden presentar diferentes fenómenos como la falla por desprendimiento dentro del concreto, en la cual la lámina extrae parte de la matriz una vez que se produce la falla cerca de la superficie de adherencia. Teniendo en cuenta el comportamiento del adhesivo entre la interfaz y la lámina, existen tres tipos de fallas que se pueden producir por desunión (Al-Tamimi et al., 2014):

- En la superficie del adhesivo cerca a la lámina.

- En el centro de la capa de adhesivo.
- En el adhesivo, cerca de la superficie de concreto.

Sin embargo, es posible que se presenten fallas por adhesión/cohesión que puede evitarse con el uso del raspador de aguja para lograr la superficie, exponer los agregados gruesos y garantizar una mejor adherencia (Zhou et al., 2017). En cuanto a la desunión prematura en la interfaz, se recomienda utilizar tratamientos superficiales como el abujardado o el arenado (Mukhtar & Faysal, 2018), los cuales consisten en remover la capa superficial de concreto endurecido mediante el fracturado de los agregados gruesos, y eliminar sus contaminantes mediante un chorro abrasivo de arena, respectivamente.

En cuanto al dimensionamiento de la longitud de adherencia efectiva, existen tres métodos experimentales reportados por (Moghaddas et al., 2019) (citado por (F. Zhang, Wan, et al., 2021a)) que pueden utilizarse para verificar los resultados del ensayo una vez sea ejecutado (Apéndice A). Por otra parte, se conocen estudios con placas de bambú laminado adheridas con DL-JGN, originalmente usado para pegar placas de acero a hormigón (F. Zhang, Wan, et al., 2021a), en los cuales fue posible predecir las longitudes de adherencia efectiva utilizando las ecuaciones teóricas recopiladas en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Predicción de longitudes de adherencia*

Artículo	Fórmula
(Muhtar et al., 2019)	$Le = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad Ec. 2$
(Dai et al., 2005)	$Le = 1.6841 \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{cu}^{2/3}}} \quad Ec. 3$
(JG Teng et al., 2002)	$Le = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_t}} \quad Ec. 4$
(J. Zhang et al., 2018)	$Le = \frac{\sqrt{2E_f t_f}}{10.4\sqrt{G_f}} \ln\left(\frac{1+0.96}{1-0.96}\right) \quad Ec. 5$

Artículo	Fórmula
	$G_f = 0.514f_c'^{0.236}$ Ec. 6

*Nota.* Estos artículos fueron citados por (F. Zhang, Wan, et al., 2021a).

Donde  $f_c'$  es la resistencia a la compresión del cilindro de concreto,  $f_{cu}$ , es la resistencia a la compresión cúbica del concreto; mientras  $f_t$  es la resistencia a la tensión del mismo material; por otra parte,  $E_f$  y  $t_f$  es el módulo elástico y el espesor de la fibra, respectivamente.

$$f_c' = 0.78f_{cu} \quad Ec. 7$$

(D. Zhang et al., 2018)(citado por (F. Zhang, Wan, et al., 2021a))

$$f_t = 0.395f_{cu}^{0.55} \quad Ec. 8$$

(D. Zhang et al., 2018)(citado por (F. Zhang, Wan, et al., 2021a))

### 3.1.2. *Ensayo de corte doble*

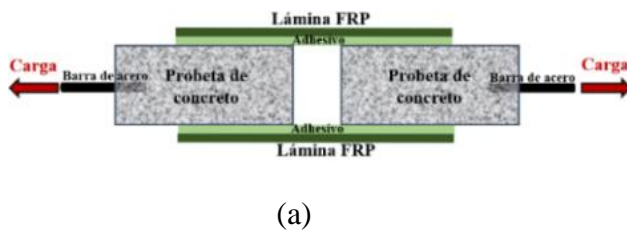
Este ensayo tiene varias similitudes en el método de preparación de la superficie de la probeta de concreto con los ensayos anteriores, la utilización de la maquina universal y el método de fijación de la lámina. Sin embargo, a diferencia del método anterior, en el cortante doble la fuerza de tracción se aplica simultáneamente en dos laminas adheridas en los lados opuestos, las cuales pueden rodear un bloque de concreto o unir dos bloques puestos en serie. En este último caso se suele utilizar una abrazadera de acero para asegurar que las láminas permanezcan en el mismo plano mientras se adhieren y una plantilla sobre las probetas que asegure un espesor uniforme del adhesivo (Mukhtar & Faysal, 2018).

De manera similar a los modelos de sujeción en el método de cortante simple, el diseño del montaje para cargas cíclicas necesita un sistema de fijación que permita únicamente el desplazamiento vertical del montaje para evitar momentos de rotación y movimientos laterales (Mukhtar & Faysal, 2018).

Por otra parte, se encontró una variación del montaje clásico (Figura 3), en el cual el autor (Mukhtar & Faysal, 2018) simplifica el modelo convencional y evita la excentricidad por desalineación al usar una sola probeta para el ensayo, además propone un anclaje adaptable que no precisa algún corte sobre la fibra y facilita su manipulación (Figura 4).

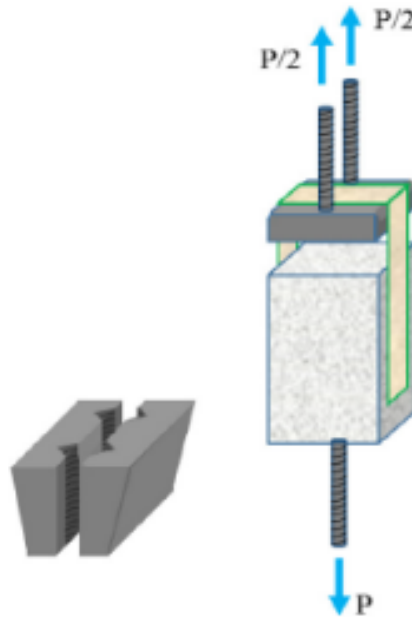
**Figura 3.**

*Montaje experimental a corte doble*



**Figura 4.**

*Montaje experimental propuesto por (Mukhtar & Faysal, 2018)*



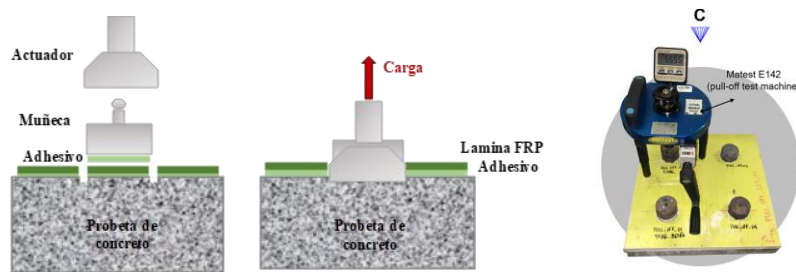
### 3.1.3. Extracción directa

Este es el único método estandarizado en ASTM D7522 (“Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates 1,” 2021) para medir la unión de concreto y FRP. El montaje consiste en unir un disco de acero a la superficie de la fibra que también servirá como guía para cortar alrededor del disco utilizando una sierra; luego, con ayuda de un actuador se realiza la extracción el disco del hormigón como se muestra en la Figura 5.

La prueba se utiliza típicamente para medir la adherencia de la unión, así como la resistencia del hormigón subyacente. Sin embargo, existen discrepancias debido a la diferencia entre el comportamiento real de una viga y la metodología de tensión directa del ensayo. Por tal razón, se recomienda que también se realicen algunas pruebas complementarias, como la prueba acústica. De igual forma, los resultados pueden ser altamente localizados y dependientes de parámetros del concreto, pues los agregados pequeños pueden ayudar a limitar la variabilidad dentro de un solo bloque [1].

#### Figura 5.

##### Montaje experimental de extracción directa



(a)

(b)(Sena-Cruz et al., 2020)

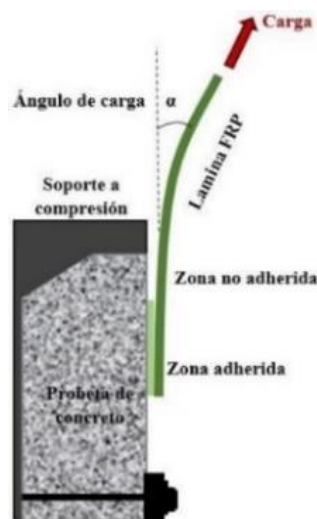
### 3.1.4. Mixto

No existe una configuración determinada para los montajes experimentales mixtos. Estos hacen alusión al modo de falla de la interfaz de adherencia entre el concreto y la fibra cuando se presentan esfuerzos cortantes y de desprendimiento (Mukhtar & Faysal, 2018).

Dentro de los autores que han empleado este método para sus investigaciones está [16] (citado por (Mukhtar & Faysal, 2018)), quien modificó el montaje de flexión reemplazando la mitad del espécimen por un accesorio de metal móvil que le permite un mayor control sobre el efecto de desprendimiento. En el artículo (Chalot et al., 2019) (citado por (Mukhtar & Faysal, 2018)), en el cual también modificó el mismo montaje, se agregó un pasador de carga especial que simula los efectos de desprendimiento; de igual manera en los artículos [18] y (Ghorbani et al., 2017) (citados por (Mukhtar & Faysal, 2018)) parten de un montaje experimental simple donde se puede variar el ángulo de aplicación de la carga a la fibra (Figura 6). En el caso de que la carga sea perpendicular a la lámina se presenta desprendimiento puro.

### Figura 6.

*Montaje experimental de ensayo mixto*



### 3.1.5. Flexión

Este tipo de ensayos con pruebas de viga se consideran como los más convenientes y precisos ya que ejemplifican el comportamiento del elemento in situ (Zheng et al., 2016). Durante esta prueba se suelen presentar excesos de concentraciones de tensiones en la parte inferior de la viga, sin embargo, se suele evitar este fenómeno para disminuir la pérdida considerable de rigidez en la zona agrietada, por tal razón se implementan dos tipos de configuración de los montajes. En el primero se unen dos prismas idénticos de concreto mediante una bisagra en la sección longitudinal a compresión mientras que por la sección a tensión se refuerzan los elementos con láminas de fibra (Figura 7-a) (Li et al., 2019); para el segundo tipo de montaje se trabaja con una viga completa a la cual se le realiza un corte con una sierra en la cara a tensión y sobre la cual se adhiere la fibra (Figura 7-b) (Bennegadi et al., 2016)(Mukhtar & Faysal, 2018). Estos modelos suelen ser sometidos a 3 o 4 cargas, de las cuales hacen parte los dos apoyos de los elementos y su distribución puede inducir a la falla del montaje, pues la unión de la fibra está sujeta a esfuerzos tanto normales como cortantes bajo carga, especialmente en la zona de fisuración. Por otra parte, en el diseño de este montaje se debe controlar la relación largo-ancho del bloque de concreto pues este puede ser susceptible a la falla por cortante especialmente cuando esta relación es baja (Mukhtar & Faysal, 2018).

#### Figura 7.

##### *Montajes para prueba a flexión*



(a)(Li et al., 2019)



(b)(F. Zhang, Dai, et al., 2021)

#### 4. Propuesta propia

Teniendo en cuenta los equipos disponibles en el laboratorio de la escuela de ingeniería civil (EIC) de la Universidad Industrial de Santander y los montajes experimentales ya descritos, se seleccionó la máquina de ensayo universal (Figura 8) como referente para el diseño del montaje. De igual manera se eligió el modelo de cortante doble como método de prueba, pues es el de mejor adaptación al equipo disponible. El montaje de cortante simple fue descartado debido al posible desprendimiento que puede generar esfuerzos diferentes al cortante y no permitir un análisis completo de la adherencia entre la malla de fique y la probeta de concreto.

Por otra parte, el montaje de cortante doble mejorado propuesto por (Mukhtar & Faysal, 2018) reduce o evita completamente los desplazamientos no uniformes que promueven la desunión entre la malla y la probeta. Para la implementación de este modelo es necesaria una adaptación, debido a que la mordaza que propone se propone en (Mukhtar & Faysal, 2018) no tiene un anclaje óptimo para el equipo disponible en la EIC. Por lo tanto, se plantea un sistema más simple que consiste en una barra de acero concéntrica soldada perpendicularmente a otra barra, que a su vez está adherida a un par de barras roscadas y sujetas a la placa de acero desmontable mediante tuercas (Figura 9).

**Figura 8.**

*Maquina universal de ensayos*



**Figura 9.**

*Acople propuesto*

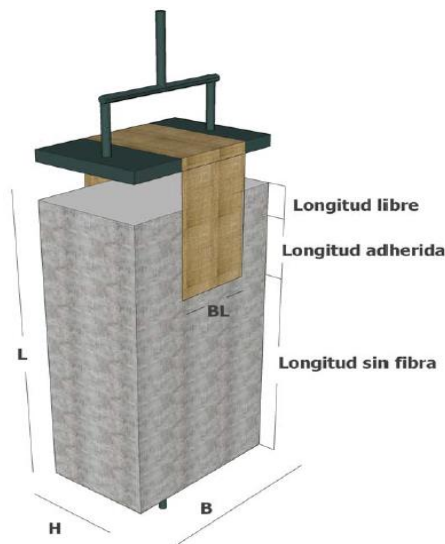


#### 4.1. Predimensionamiento

Teniendo en cuenta que el montaje experimental seleccionado se asemeja a los de tipo cortante doble, a partir de la revisión bibliográfica se recopilieron las dimensiones típicas utilizadas en los elementos que conforman dichos ensayos y que a su vez son de interés para el dimensionamiento de la propuesta. Generalmente las probetas de concreto empleadas tienen secciones transversales cuadradas y/o rectangulares, una longitud adherida ( $L_{adh}$ ) entre la fibra y la probeta y una longitud sin fibra ( $L_{sf}$ ) como se observa en la Figura 10.

#### Figura 10.

*Simulación vista perfil del modelo*



El 70% de los autores consultados han utilizado secciones transversales cuadradas (Chalot et al., 2019), (P. Zhang et al., 2020), (Al-Tamimi et al., 2014; Gravina et al., 2014), (Mukhtar & Faysal, 2018), (F. Zhang, Wan, et al., 2021a), cuyas dimensiones se presentan en la Tabla 3. De acuerdo con estas se presenta una moda y un promedio de las dimensiones B y H de la Figura 10

de 150 y 167 mm, y 150 y 142 mm, respectivamente, con base a los cuales se decide iniciar el predimensionamiento de la probeta de concreto con dimensiones de 150 x 150 mm.

**Tabla 3.**

*Dimensiones de probetas y mallas utilizadas por otros autores*

Referencia	Probeta de concreto [mm]				Malla [mm]				
	B	H	L	Lsf	BL	tf	L	LI	L adh
(Chalot et al., 2019)	140	140	260	60	50	1 0.48	440	-	200
(P. Zhang et al., 2020)	100	100	237	14.5	50	4	225.5	-	-
(Al-Saoudi et al., 2022)	400	250	400	30	120	1.4	800	-	370
(Zhou et al., 2021)	200	150	400	100	50	1.2	300	-	-
(Zhou et al., 2017)	200	150	400	50	50	1.2	1300	50	300
(Al-Tamimi et al., 2014)	75	75	240	55	50	1.2	365	-	185
(Gravina et al., 2014)	150	150	300	.	50 75	1.29 1.33	200 225	25	100
(Mukhtar & Faysal, 2018)	100	100	400	50	50	-	426	50	76
(Mukhtar & Faysal, 2018)	150	150	400	-	-	-	-	-	-
(F. Zhang, Wan, et al., 2021a)	150	150	300	-	20 50 100 150	3 5 10	150 200 250 350	20	50 100 150 250

Con relación a la longitud (L) de la probeta, en la Tabla 4 se encuentran los valores utilizados por los autores consultados, junto con la proporción de estas respecto a la base (L/B) y la altura (L/H) empleada por cada uno. La longitud correspondiente a una ST de 150 x 150 mm teniendo en cuenta el promedio de las proporciones descritas es 353 mm y 365 mm, respectivamente, junto con una moda de 400 mm. Por tal razón se inicia el dimensionamiento con una longitud de 350 mm al asemejarse más a las longitudes promedio.

**Tabla 4.***Longitud de la probeta*

<b>Longitud (L) [mm]</b>	<b>Proporción L/B</b>	<b>Proporción L/H</b>
237	2.37	2.37
240	3.2	3.2
260	1.86	1.86
300	2	2
<b>400</b>	2.33	2.72
<b>Promedio de proporciones</b>	<b>2.35</b>	<b>2.43</b>

Es importante dejar una longitud libre sin fibra (Lsf) entre el inicio de la probeta donde se encuentra el anclaje y el inicio de la malla adherida (Figura 10), dado que, si llegase a existir una falla por arrancamiento del concreto, este no debería extraer ninguna porción de la malla. Por esta razón, se determinaron las longitudes sin fibra respecto a la longitud total usadas por cada autor (Lsf/L), las cuales se muestran en la Tabla 5. Según el análisis estadístico descriptivo, la moda y el promedio son iguales a 50 mm y 51.36 mm, respectivamente, sin embargo, al analizar las proporciones Lsf/L, el rango de valores dentro del cual se selecciona Lsf se extiende, pues la proporción mínima es de 6%, mientras la máxima es de 25%. Por ende, para el dimensionamiento se optó por  $Lsf = 100$  mm.

**Tabla 5.***Longitud sin lámina*

<b>(Lsf) [mm]</b>	<b>(Lsf/L)</b>
14.5	0.06
30	0.08
50	0.13
55	0.23
60	0.23
100	0.25

Una vez seleccionadas las dimensiones de la probeta de concreto, se revisaron las dimensiones de la malla de fibra vegetal, es decir, su ancho (BL) y espesor (tf), así como las longitudes de adherencia (Ladh) y la libre (Ll). Estas son las únicas dimensiones de interés para el predimensionamiento del montaje.

El ancho (BL) más utilizado por los autores es de 50 mm (Tabla 3), por lo cual se define está como la base de la malla de fique. Si bien no se puede definir un espesor único para la malla de la fibra de fique, dado que esta es un producto que presenta alta variabilidad en el diámetro de los hilos, se espera que este espesor se asemeje a la moda de los datos encontrados en la literatura (aproximadamente de 1.2 mm, Tabla 2 del Apéndice B).

La longitud adherida (Ladh) de la malla a la probeta más utilizada en la literatura consultada es de 100 mm, mientras el promedio equivale a 178.1 mm. Por otra parte, teniendo en cuenta el promedio de los cocientes Ladh/L utilizados por otros autores (Tabla 3 del Apéndice B), es decir 0.56, lo que equivale a Ladh = 196 mm para L = 350 mm, se propone un valor de 200 mm para el dimensionamiento. Con relación a la longitud libre (Ll), la cual es de gran importancia para la prevención de la falla por cuña del bloque de concreto, la moda y el promedio son de 50 mm y 36.25 mm, respectivamente (Tabla 4 del Apéndice B). Sin embargo, por razones de seguridad se opta por Ll = 50 mm como predimensionamiento.

## 5. Diseño

El diseño del montaje parte de una fuerza de diseño (Nadm) seleccionada con base en los resultados desarrollados en el artículo (Laverde, 2023), en el cual se define una fuerza máxima a tracción resistida por la malla de fique natural de entramado doble de 2 kN ( $p$ ) para un ancho de malla de 50 mm, que cuenta con 12 hilos de área = 1.04 mm<sup>2</sup> y área transversal de la malla = 12.45

mm<sup>2</sup>, siendo esta la más resistente de las mallas evaluadas en el estudio (Laverde, 2023). Al ser un ensayo de cortante doble se debe duplicar dicha fuerza. Además, considerando la variabilidad de las propiedades a tracción de las fibras vegetales, se decide emplear un factor de seguridad (F.S.) de 2, por lo cual la fuerza de diseño es igual a 8 kN (Ecuación 9).

$$N_{adm} = p * 2 * F.S. \quad Ec. 9$$

$$N_{adm} = 8 [KN]$$

### 5.1. Acople inferior

La parte inferior del diseño consta de una barra corrugada con cabeza embebida en la probeta de concreto (de sección cuadrada). La profundidad de anclaje se definió de acuerdo con la ecuación 10, la cual corresponde a la ecuación descrita en la sección C.12.6.2 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a).

$$l_{at} = \left( \frac{0.19 * \psi c * f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad Ec. 10$$

El factor de modificación para la longitud de desarrollo ( $\psi c$ ) toma el valor de 1 pues para el diseño se decidió utilizar un concreto normal, la resistencia a la fluencia del acero ( $f_y$ ) está limitado a un valor máximo de 420 MPa y el diámetro de la barra ( $d_b$ ) no debe exceder 36 mm (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), por lo cual se selecciona una barra de 15.9 mm (5/8”). En cuanto a la resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ) se decide utilizar un valor de 28 MPa.

De acuerdo con los datos anteriores, la longitud de desarrollo de la barra debe ser de 240 mm, respetando las condiciones estipuladas en la sección C.12.6.2 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), sin embargo, en este mismo apartado se menciona la posibilidad de reducir este valor siempre y cuando el acero suministrado

(Asum) sea mayor al requerido (Areq); este último se calcula en función del esfuerzo de fluencia (420 MPa) y de la fuerza de diseño (8 kN), siendo el área de la ST de la barra de acero requerida de  $52.5 \text{ mm}^2$  para y la suministrada de  $199 \text{ mm}^2$ . Para disminuir la longitud de desarrollo se multiplica el valor inicial por un factor de 0.26 (Areq/Asum), dando como longitud de anclaje mínima requerida igual a 64 mm, medidos desde la base de la cabeza de la barra; sin embargo, esta medida puede cambiar respecto a los métodos de falla.

En cuanto a la cabeza de la barra, el apartado C.12.6.1 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a) define que su área debe ser mayor a 4 veces el área de la barra, es decir mayor a  $794 \text{ mm}^2$ , sin tener en cuenta el área de la barra dentro de la cabeza.

Para revisar la longitud de anclaje calculada se evaluaron tres tipos de fallas respecto a la sección C-D.5 de la NSR-10 Título C (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a) :

#### **5.1.1. Resistencia del acero de un anclaje en tracción:**

Para evitar este tipo de falla se debe asegurar que la resistencia nominal del anclaje ( $N_{sa}$ ) reducido por un factor  $\phi$  sea mayor a la fuerza de diseño ( $N_{adm} = 8 \text{ kN}$ ).

Dicha resistencia se calcula mediante el área efectiva de la sección del anclaje de ( $A_{se,N}$ ) y la resistencia especificada a la tracción del acero ( $f_{uta}$ ) mediante la ecuación 11 la cual corresponde a la ecuación C-D-3 de la sección C-D.5.1.2. del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), cuyo valor no debe ser mayor que el menor entre  $1.9f_y$  y 860 MPa, siendo  $f_y$  igual a 420 MPa. Se decidió seleccionar la opción más desfavorable, en la cuál  $f_{uta}$  equivale a 798 MPa. A partir de estos datos se calcula una resistencia nominal de 158.5 kN mediante la ecuación 11, la cual corresponde a la ecuación C-D-3 de la

sección C-D.5.1.2. del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), que posteriormente debe ser reducida por un factor de 0.7, de acuerdo con el apartado C-D.4.4 (Opción C, condición B)(Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), dando como resultado 111 kN. Siendo el resultado mayor a la fuerza de diseño se asegura la resistencia a tracción.

$$N_{sa} = A_{se,N} * f_{uta} \quad Ec. 11$$

$$N_{sa} = 158.5[KN]$$

$$N_{sa} * \phi = 111[KN] \quad Ec. 12$$

### 5.1.2. Resistencia al arrancamiento del concreto:

La resistencia nominal de arrancamiento del concreto no debe exceder el valor de  $N_{cb}$  el cual se calcula empleando la ecuación 13 la cual corresponde a la ecuación C-D-4 de la sección C-D.5.2.1. del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a).

$$N_{cb} = \frac{ANc}{ANco} * \psi_{ec,N} * \psi_{c,N} * \psi_{cp,N} * Nb \quad Ec. 13$$

Al ser  $ANco$  y  $ANc$  las áreas máximas proyectadas para un solo anclaje y para un grupo de anclajes, respectivamente, su relación toma el valor de 1 pues solo hay una única barra embebida en la probeta.

De igual manera los factores de efecto de borde ( $\psi_{ec,N}$ ), de fisuración ( $\psi_{c,N}$ ) y de hendimiento ( $\psi_{cp,N}$ ) se toman como 1 de acuerdo con la sección C-D.5.2. del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a). El último factor de la ecuación es la resistencia básica al arrancamiento del concreto de un solo anclaje ( $Nb$ ), el cual está dado por

la ecuación 14 la cual corresponde a la ecuación C-D-7 de la sección C-D.5.2.2. del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a).

$$N_b = K_c * \lambda_a * \sqrt{f'c} * hef^{1.5} \quad Ec. 14$$

$$N_b = 27 [KN]$$

$$N_{cb} * \phi = 27 * 0.7 \quad Ec. 15$$

$$N_{cb} * \phi = 19.7 [KN]$$

El coeficiente  $K_c$  es equivalente a 10 para anclajes preinstalados según la sección C-D.5.2.2 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), mientras el factor de variación en caso de manejar concretos livianos ( $\lambda_a$ ) se toma como 1. En cuanto a la profundidad efectiva ( $hef$ ), esta es igual a la longitud de desarrollo ( $l_{dt}$ ) ya calculada en la ecuación 10 y se decide aproximar a 70 mm.

Para verificar los datos predimensionados se calcula el área máxima de fallo de un anclaje ( $AN_{co}$ ) (Figura 6 Apéndice C).

$$AN_{co} = 9 * (h_{ef})^2 \quad Ec. 16$$

La ecuación 16 la cual corresponde a la ecuación C-D-6 de la sección C-D.5.2.1 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a) resulta en  $AN_{co} = 36864 \text{ mm}^2$ , cuyas dimensiones proyectadas sobre el área transversal de la probeta son de 192 x 192 mm, teniendo en cuenta el diámetro de la barra. Por esta razón se decide aumentar las dimensiones propuestas en el predimensionamiento y utilizar una sección de 200 x 200 mm para el diseño de la probeta.

### 5.1.3. Resistencia a la extracción por deslizamiento:

La resistencia nominal a la extracción por deslizamiento en tracción de un solo anclaje ( $N_{pn}$ ) es expresada en la ecuación 17 que corresponde a la ecuación C-D-14 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), y depende directamente de la resistencia básica de un solo anclaje por deslizamiento ( $N_p$ ) y del factor de efecto de fisuración para deslizamiento ( $\psi_{c,p}$ ). Este último es especificado en la sección C-D.5.3.6 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a), cuyo valor es de 1 en las condiciones más desfavorables, mientras  $N_p$  es denotado en la ecuación 18 correspondiente a la ecuación C-D-15 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a). Esta última también está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto ( $f'c$ ) y el área neta de apoyo de la cabeza del anclaje ( $A_{brg}$ ), la cual debe ser mayor o igual a  $794 \text{ mm}^2$  con respecto a los límites establecidos en la sección C.12.6.1 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a).

$$\text{➤ } N_{pn} = \psi_{c,p} * N_p \quad \text{Ec. 17}$$

$$N_p = 8 * A_{brg} * f'c \quad \text{Ec. 18}$$

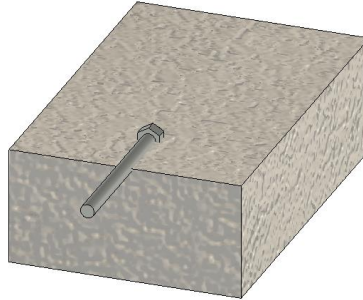
$$N_p = 178[\text{KN}]$$

$$N_{pn} * \phi = 124.5[\text{KN}]$$

Teniendo las especificaciones y condiciones anteriores, la longitud de la barra corrugada será de 170 mm, teniendo en cuenta la longitud de desarrollo de 70 mm medidos desde la base de la cabeza y 100 mm extra para permitir el agarre a la máquina de ensayos (Figura 11). De igual manera la cabeza debe ser de forma hexagonal con un área de  $993 \text{ mm}^2$  que abarca la sección transversal de la barra corrugada de 5/8" pulgada.

**Figura 11.**

*Corte de sección para detalle del anclaje inferior*

**5.2. Concreto a tensión**

La probeta de concreto de dimensiones 200 x 200 mm no debe fallar a tensión, lo cual equivale a que el esfuerzo normal promedio en esta no debe exceder el módulo de rotura ( $f_r$ ), expresado en la ecuación 19 la cual corresponde a la ecuación C.9-10 de la sección C.9.5.2.3 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a)

$$f_r = 0.62 * \lambda \sqrt{f'_c} \quad Ec. 19$$

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza de diseño}}{\text{Área de la probeta}} \quad Ec. 20$$

El factor de modificación ( $\lambda$ ) del concreto se toma como 1 según la sección C.8.6.1. del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a) , lo cual resulta en  $f_r = 3.28$  MPa. Al evaluar el esfuerzo al que se someta la sección ya descrita este es mucho menor al módulo de rotura ( $\sigma = 0.2$  [MPa]), por tal razón se garantiza su resistencia.

**5.3. Longitud de adherencia efectiva del fique (Le)**

Para estimar la longitud de adherencia efectiva, y teniendo en cuenta los resultados de la revisión bibliográfica, se necesitan factores como la resistencia a la compresión cúbica del

concreto ( $f_{cu}$ ), la resistencia a la tensión del concreto ( $f_t$ ) y la energía de fractura ( $G_f$ ), expresados en las ecuaciones 21, 8 y 6, respectivamente y que posteriormente deben ser usados para calcular los valores de la Tabla 6. Además, es necesario conocer el espesor de la malla de fique ( $t_f$ ) y su módulo de elasticidad ( $E_f$ ), por lo cual se consultaron dichas propiedades de la investigación [29], en la cual se trabajaron mallas sencillas (M1) y dobles (M2), alcalinizadas (M1A y M2A) y hornificadas (M1H y M2H), cada una de ellas con diferentes propiedades.

$$f_{cu} = \frac{f'_c}{0.78} \quad Ec. 21$$

$$f_{cu} = 35.9 \text{ [MPa]}$$

$$f_t = 2.53 \text{ [MPa]}$$

$$G_f = 1.13$$

Empleando las ecuaciones 2 a 5, se calcularon las diferentes longitudes de adherencia efectiva según el espesor y las propiedades de la malla. Los resultados se recopilaron en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Longitudes de adherencia para mallas con y sin tratamiento*

<b>Malla</b>	<b><math>t_f</math> [mm]</b>	<b><math>E_f</math> [MPa]</b>	<b><math>Le_1</math> [mm]</b>	<b><math>Le_2</math> [mm]</b>	<b><math>Le_3</math> [mm]</b>	<b><math>Le_4</math> [mm]</b>	<b><math>Le_{min}</math> [mm]</b>	<b><math>Le_{prom}</math> [mm]</b>	<b><math>Le_{max}</math> [mm]</b>
<b>M1</b>	1.15	3088	25.90	30.41	25.04	29.68	25.04	27.76	30.41
<b>M2</b>	1.15	3983	29.41	34.54	28.43	33.70	28.43	31.52	34.54
<b>M1A</b>	0.82	4984	27.80	32.65	26.88	31.86	26.88	29.80	32.65
<b>M2A</b>	0.82	5232	28.49	33.45	27.54	32.64	27.54	30.53	33.45
<b>M1H</b>	1.01	3277	24.99	29.34	24.16	28.63	24.16	26.78	29.34
<b>M2H</b>	1.01	4430	29.05	34.12	28.09	33.29	28.09	31.14	34.12
							<b>24.16</b>	<b>29.59</b>	<b>34.54</b>

Para que la adherencia entre la malla de fique y el concreto sea efectiva se debe adherir como mínimo 35 mm, siendo esta longitud la máxima  $L_e$  calculada (Tabla 6). Sin embargo, estas ecuaciones están planteadas para ensayos de cortante simple y para otro tipo de láminas de

refuerzo, como se especificó en la sección 2.1.1, además dependen del espesor y modulo elástico de la malla de refuerzo (Tabla 2). Por lo cual se decidió variar la longitud de adherencia al realizar el ensayo y proponer medidas tentativas longitudes de 5, 10, 15, 25, 50, 100, 150 y 200 mm.

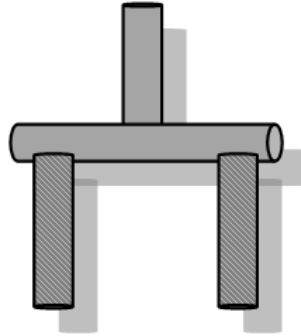
#### **5.4.Acople superior**

El acople superior del modelo está compuesto por una lámina de acero que se sujeta a un elemento metálico mediante tuercas. Esto permite reutilizar este elemento en múltiples ensayos, por lo que se requiere que tenga alta rigidez y que los esfuerzos se mantengan dentro del rango lineal elástico.

Para lograr esto, se ha decidido que el elemento metálico se fabrique en acero estructural para barras de refuerzo Gr. 60, con  $F_y = 420$  MPa, módulo de elasticidad (E) de 200 GPa y sección transversal circular. Por otro lado, la lámina de acero se fabricará en acero estructural Gr. 50, con  $F_y = 345$  MPa.

##### **5.4.1. Elemento metálico**

El elemento metálico está compuesto por cuatro barras corrugadas de las cuales dos van roscadas en un extremo (Figura 12).

**Figura 12.***Elemento metálico*

Para fines de diseño, la barra horizontal fue simplificada como una viga simplemente apoyada que recibe una carga puntual de 8 kN en su centro. El objetivo es evaluar los diámetros comerciales hasta encontrar el que permita mantener los parámetros de elasticidad y rigidez aceptables. Para este último paso, el valor de deformación máxima en el centro de la barra se tomó como 0.1 mm.

Para calcular la deformación ( $\Delta$ ), se utilizan las ecuaciones 23 y 25, donde  $r$  es el radio de la barra y  $L$  la longitud. Posteriormente se calcula el momento máximo de la barra ( $M$ ) y el esfuerzo ( $\sigma$ ). Este proceso se realizó para los diferentes diámetros comerciales y se recopilaron en la Tabla 7.

$$L = \text{separación entre orificios} + \phi_{\text{barra}} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48E\left(\frac{\pi}{4}r^4\right)} \quad \text{Ec. 23}$$

$$M = \frac{PL}{4} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\sigma = \frac{Mr}{I} \quad \text{Ec. 25}$$

**Tabla 7.***Deformaciones y esfuerzos calculados*

$\emptyset$ [in]	$\emptyset$ [mm]	I [mm <sup>4</sup> ]	L [mm]	$\Delta$ [mm]	M [kN-mm]	$\sigma$ [GPa]
1/4	6.35	80	116.4	<b>16.45</b>	232.70	<b>9257</b>
3/8	9.5	400	119.5	<b>3.56</b>	239.00	<b>2839</b>
1/2	12.7	1277	122.7	<b>1.21</b>	245.40	<b>1220</b>
5/8	15.9	3137	125.9	<b>0.53</b>	251.80	<b>638</b>
3/4	19.9	7698	129.9	<b>0.24</b>	259.80	<b>336</b>
7/8	22.2	11923	132.2	<b>0.16</b>	264.40	<b>246</b>
1	25.4	20432	135.4	<b>0.10</b>	270.80	<b>168</b>
1-1/4	31.75	49882	141.8	<b>0.05</b>	283.50	<b>90</b>

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 7, la barra de diámetro 1-1/4” es la única que cumple con una deflexión menor a 0.1 mm y un esfuerzo menor a 420/(FS=2) MPa.

Una vez seleccionado el diámetro de la barra horizontal, se evalúa la resistencia a la tensión de los elementos metálicos verticales. Para ello, se calculó la fuerza máxima (N) utilizando la ecuación 28 la cual corresponde a la ecuación F.2.10.3-1 y se aplicó un factor de reducción de 0.75 de acuerdo con la sección F.2.10.3.6 del reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010b).

$$N = \sigma * A \quad Ec. 26$$

$$N = 332526 [N]$$

$$N * \phi = 249.4 [KN] \quad Ec. 27$$

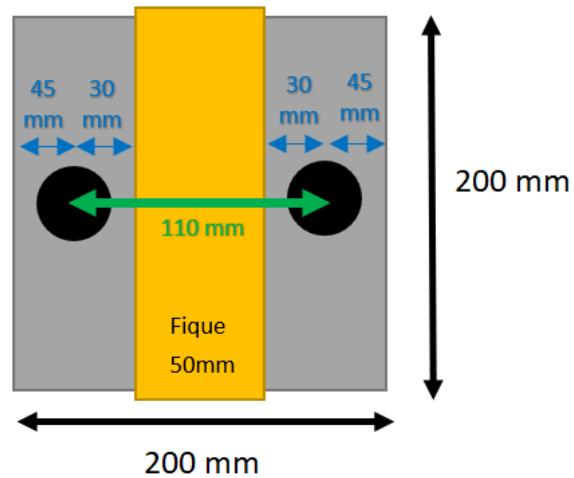
De esta forma, al superar los 8 kN que soportará el acople, se verifica que el elemento metálico con un diámetro de 1-1/4” resistirá los esfuerzos a tensión y cortante del ensayo, de manera rígida y dentro del rango lineal elástico.

### 5.4.2. Dimensiones de la platina

Se propone una platina de dimensiones iguales a la ST de la probeta de concreto, es decir de 200 x 200 mm, y cuyos criterios de diseño junto con los valores seleccionados se muestran en la Tabla 8 y Figura 13.

**Figura 13.**

*Dimensiones de platina*



**Tabla 8.**

*Criterios de diseño de platina*

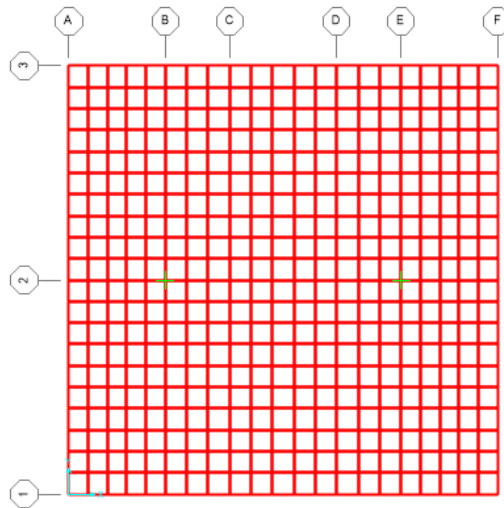
Sección Título F (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010b)	Criterio	Valor
F.2.10.3.3.	Espaciamiento mínimo ( $S_{min}$ ) $3d$	$S_{min} = 104.85 [mm]$ $S = 110 [mm]$
Tabla F.2.10.3-3	Diámetro nominal ( $d = \emptyset + 3.2 mm$ )	$d = 34.95 [mm]$
F.2.10.3.5.	Espaciamiento máximo ( $S_{max}$ )	$300 [mm]$
F.2.10.3.4. Tabla F.2.10.3-4	Distancia mínima al borde ( $a_{min}$ )	$41.3 [mm]$
F.2.10.3.5.	Distancia máxima al borde	$150 [mm]$

Teniendo en cuenta que la separación entre orificios es de 110 mm y la distancia del centro del orificio al borde es de 45 mm, se cumple con los cinco criterios descritos anteriormente y se procede a revisar las deformaciones y los esfuerzos, empleando el software SAP 2000 (Habibullah, n.d.).

La platina de acero se modeló utilizando el material que trae por defecto el programa para aceros que cumplen con la ASTM A992 (“Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates 1,” 2021) Gr. 50 (Figura 3 del Apéndice C). La sección de la malla se modeló como un elemento shell-thin al ser una membrana de un pequeño espesor que resiste esfuerzos coplanares y perpendiculares al plano (Figura 5 del Apéndice C). Se dibujó la membrana con las dimensiones anteriormente descritas y simplemente apoyada en los centros de los orificios (Figura 14).

#### **Figura 14.**

##### *Modelo de membrana*

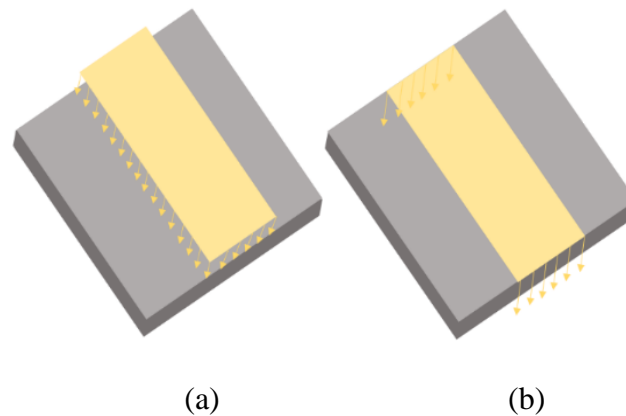


En relación con la transferencia de cargas entre la malla de fique y la lámina de acero, se analizaron dos escenarios. En el primero, la carga se distribuye uniformemente en la zona donde

la malla se apoya sobre la lámina (Figura 15-a). En el segundo, la carga se concentra en los bordes de la lámina debido a la extensión de la malla (Figura 15-b).

**Figura 15.**

*Casos de carga sobre la platina*



Para modelar el primer caso de carga se usó la herramienta “Area Loads – Uniform (Shell)” y un esfuerzo de  $0.0008 \text{ kN/mm}^2$  y se cargaron todos los recuadros comprendidos en la sección C-D de la Figura 14. Para el segundo caso se cargaron los nodos comprendidos en la sección C-D-1 y C-D-3 con la herramienta “Joint Loads” y una fuerza de  $0.667 \text{ kN}$  en cada uno de ellos. Utilizando el software SAP2000 (Habibullah, n.d.), y variando el espesor de la platina, se obtuvieron los resultados de la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Resultados de espesores para la platina*

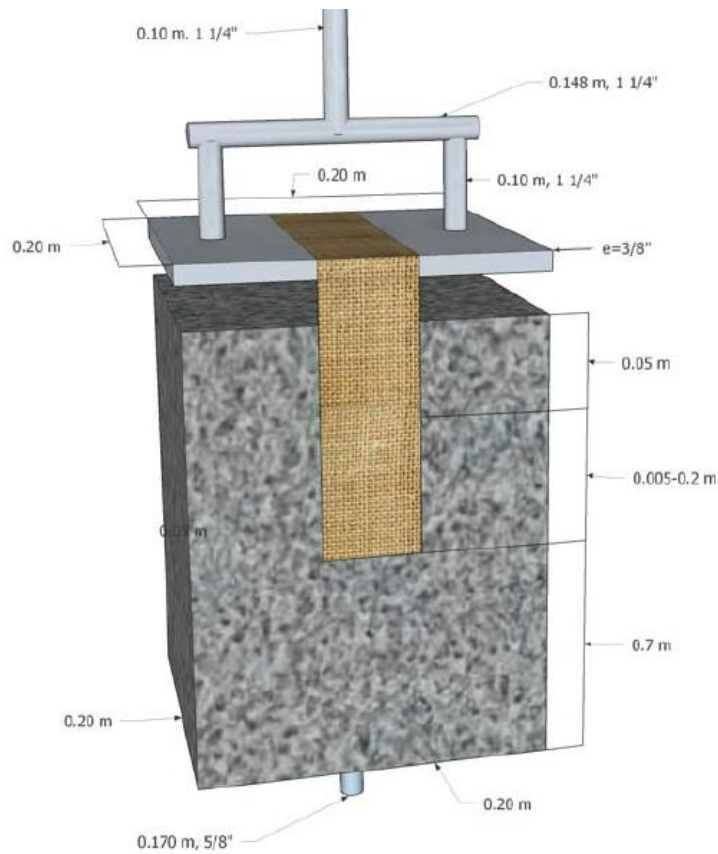
Espesor de platina	Caso de carga 1: Carga distribuida		Caso de carga 2: Carga puntual	
	$\Delta \text{ max}$ (mm)	$\sigma \text{ max}$ (Mpa)	$\Delta \text{ max}$ (mm)	$\sigma \text{ max}$ (Mpa)
1/4"	0.001228	301.169	0.001933	443.623
3/8"	0.000547	134.014	0.000860	197.326

Debido a que con un espesor de 1/4" los esfuerzos se encuentran muy cerca de la zona de fluencia para el caso de carga distribuida y sobrepasan dicho esfuerzo para el caso de carga puntual, se define un espesor de 3/8", adicional se recomienda redondear los bordes de la platina y/o cubrirlos con caucho, con el fin de evitar que estos corten la malla de fibra de fique.

En la Figura 16 se detalla el modelo final propuesto para el ensayo de cortante doble.

### Figura 16.

#### *Dimensionamiento del montaje*



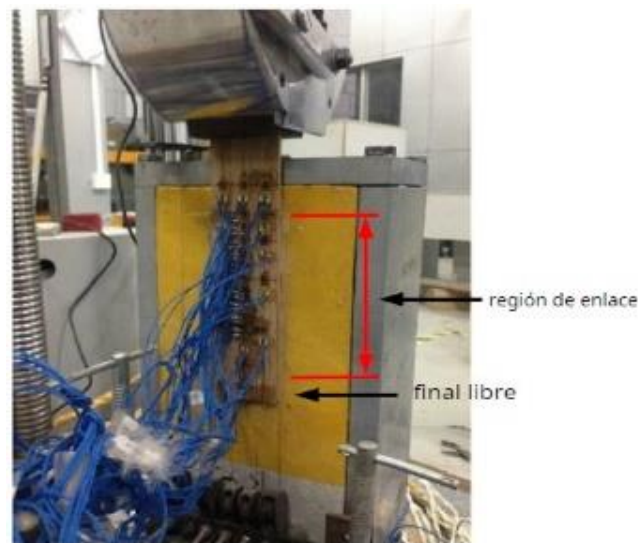
## 6. Toma de datos

En la literatura existen diversos métodos utilizados para obtener datos de deformación y esfuerzos en sistemas de refuerzo de mallas de fibra sintética o vegetal. Uno de los métodos más

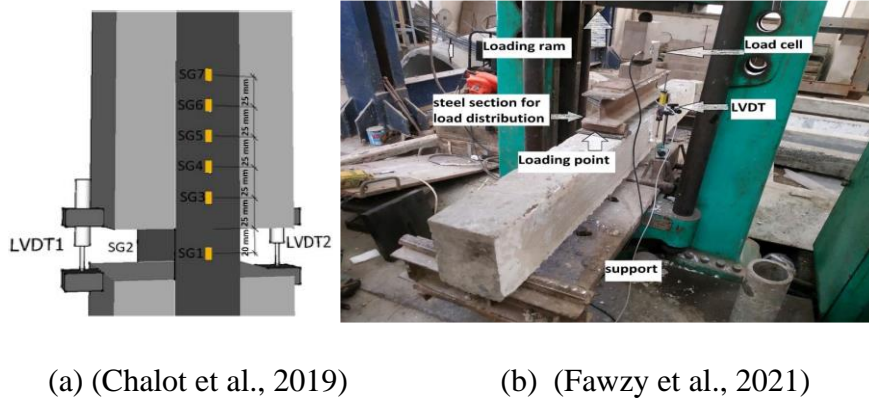
populares consiste en el uso de extensómetros colocados a lo largo y ancho de la unión de la malla con el concreto (Li et al., 2019). La deformación neta de la malla se calcula sumando los desplazamientos axiales medidos en la misma (Zhou et al., 2021), sin embargo, se pueden producir grandes variaciones en los valores de deformación de prueba debido a la no homogeneidad de la superficie del concreto, lo que afecta a la colocación de las galgas extensiométricas (Al-Tamimi et al., 2014). Este error se puede mitigar aumentando la cantidad de medidores como se muestra en la Figura 17.

### Figura 17.

*Medidores de deformación.* (F. Zhang, Wan, et al., 2021b)



Otra opción para medir los desplazamientos longitudinales de la lámina de FRP es mediante transformadores diferenciales variables lineales (LDVT). En los ensayos de cortante doble se ubican entre las dos probetas de concreto (Figura 18-a) y en los ensayos a flexión se ubican en la mitad de la luz de la probeta (Figura 18-b), de esta manera, a partir de la curva de carga vs. desplazamiento, se obtiene la curva de esfuerzo cortante vs deslizamiento relativo (Gravina et al., 2014).

**Figura 18.***Transformadores diferenciales variables lineales (LVDT)*

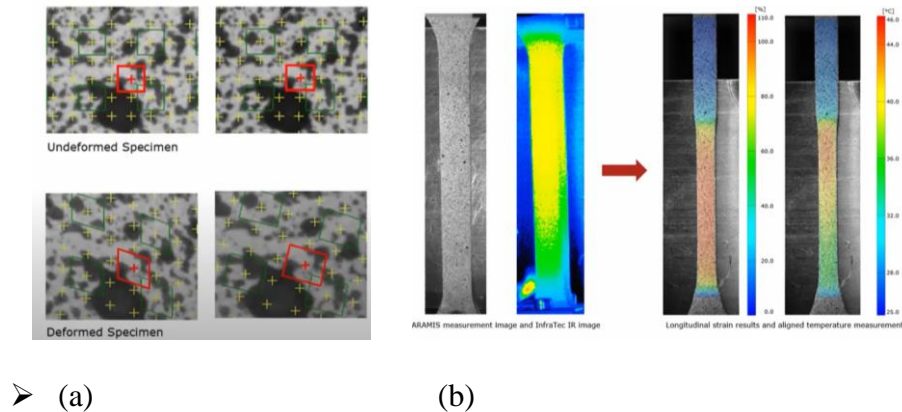
(a) (Chalot et al., 2019)

(b) (Fawzy et al., 2021)

También es frecuente el uso de la técnica de correlación de imágenes digitales (CID) para medir con precisión la deformación o el desplazamiento en una zona de la malla. Este método implica la comparación de imágenes digitales de la muestra deformada y no deformada para desarrollar un campo de desplazamiento bidimensional, proporcionando una medición espacial continua del desplazamiento de la muestra [4]. Cabe destacar que se requiere de una buena resolución e iluminación de las imágenes para su procesamiento. En la Figura 19 se observa el tratamiento de imágenes en el que se evidencia el desplazamiento de los puntos con base a los cuales se mide la deformación (Figura 19-a) y alinea factores como la deformación y la temperatura en el elemento (Figura 19-b). Para la aplicación en el ensayo la deformación axial de la malla en cualquier punto dentro de la longitud de unión se tomó como el valor medio de deformación obtenido de los puntos a lo largo de la dirección transversal (ancho de la malla) [4].

**Figura 19.**

*Medición de deformaciones con CID (GOM Correlate Pro\_ Strains and Displacements from Motion Pictures, n.d.)*



Para equilibrar las limitaciones asociadas con los enfoques individuales de cada metodología para calcular deformaciones, algunas de las investigaciones utilizan una combinación de métodos [7] [8], sin embargo, dada la disponibilidad de equipos en la EIC, se opta por el uso de correlación de imágenes digitales.

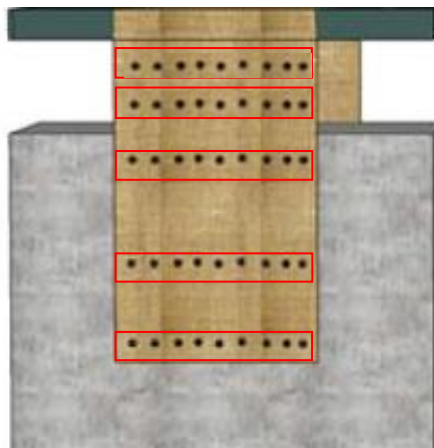
En dicho método se emplean dos patrones, el discreto o el estocástico. El patrón discreto usa una rejilla de puntos en la superficie de la muestra, lo que permite una mejor correlación y medición precisa de las deformaciones. Por otra parte, el patrón estocástico consiste en la distribución aleatoria de puntos en la superficie, lo que puede dificultar la correlación de las imágenes y producir mediciones menos precisas (Sutton & Hild, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, para lograr una alta precisión en la toma de datos, se propone utilizar el patrón discreto en tres secciones sobre el ancho de la interfaz de adherencia entre la malla de fique y el concreto, las primeras dos serán en los extremos de la longitud adherida y el tercero en la mitad de la misma, adicional a estas se agregan dos en la zona libre de la malla, señalados en la Figura 20. En cuanto a la probeta de concreto, se decidió no monitorear el elemento

debido a que el diseño garantiza una deformación insignificante (Apéndice D). Antes de comenzar el ensayo se debe tomar una primera foto del sistema descargado y otra al aplicar la carga inicial, la cual irá aumentando a una velocidad de 1 mm/min de acuerdo con la deformación unitaria máxima promedio de las mallas de fique ( $\bar{\epsilon} = 0.072$ ) [29] y las velocidades de carga usadas en la literatura consultada (Al-Saoudi et al., 2022; Chalot et al., 2019; F. Zhang, Wan, et al., 2021b; P. Zhang et al., 2020; Zhou et al., 2017, 2021). En función de este valor se define la frecuencia con la que se toman las imágenes, en este caso se sugiere una foto cada segundo. Además, se sugiere el uso del software GOM Correlate para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes utilizadas para la medición de deformaciones y desplazamientos, ya que es de uso libre y está diseñado para procesar y evaluar grandes cantidades de datos de imagen (*GOM Correlate Pro\_ Strains and Displacements from Motion Pictures*, n.d.).

### Figura 20.

*Ubicación de patrones para CID*



En el artículo (Zhou et al., 2017) se calcula la deformación axial de la fibra mediante el promedio de las deformaciones obtenidas de cada punto del patrón. Por otra parte, el deslizamiento interfacial ( $\delta_{i/2}$ ) y el esfuerzo cortante ( $\tau_{i/2}$ ) en el punto medio entre el  $i$ -ésimo y  $(i+1)$ -ésimo

punto de datos se calculan utilizando las siguientes ecuaciones y posteriormente se construye la curva de esfuerzo cortante vs deslizamientos relativos.

$$\tau_{i/2} = \frac{E_p t_p (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1})}{(L_{i+1} - L_i)}$$

$$\delta_{i/2} = \frac{(\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1})}{4} (L_{i+1} - L_i) + \sum_{i=1}^n \frac{(\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_{i+2})}{2} (L_{i+2} - L_{i+1})$$

Donde,  $\varepsilon_i$  es el valor de deformación en el i-ésimo punto de datos extraído del análisis de la CID, contado desde el extremo cargado de la malla de fique.  $L_i$  es la distancia del i-ésimo punto de datos desde el extremo cargado de la malla;  $E_p$  y  $t_p$  son el módulo elástico y el espesor de la malla; n es el número de puntos de datos contados desde el otro extremo de la malla al punto de cálculo actual.

## 7. Análisis de costos

Para calcular el costo de cada ensayo, se establecen las cantidades de material necesarias y la mano de obra requerida para llevarlo a cabo.

### 7.1. Cantidades

La probeta de concreto tiene una sección transversal fija de 200x200 mm y una longitud variable (L) en función de la longitud de adherencia (Le) de 5 a 200 mm, con  $L_{min} = 125$  mm y  $L_{max} = 310$  mm. El rango de volumen requerido para fabricar las probetas de concreto sería de  $V_{min} = 0.005 \text{ m}^3$  y  $V_{max} = 0.0124 \text{ m}^3$ . Teniendo en cuenta que el concreto a emplear es de 28 MPa, se utilizó una dosificación 1:2:2 (*Diseño de Mezclas de Concreto Para Obras Pequeñas – Un Aporte a La Sostenibilidad Ambiental*, n.d.) para aproximar el material requerido en la fabricación de cada probeta, pues se desconocen las características de los agregados para aplicar

métodos más precisos como el ACI. Por consiguiente, se multiplicó el material necesario para un metro cúbico de concreto por el volumen requerido para la elaboración de la probeta, teniendo en cuenta un desperdicio del 5% y se recopilaron los datos en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

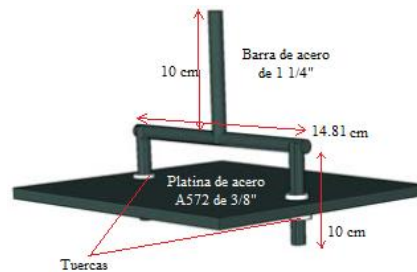
*Materiales de fabricación de la probeta*

	<b>Proporción</b>	<b>Vmin</b>	<b>Vmax</b>
<b>Cemento (kg)</b>	420	2.21	5.47
<b>Grava (m3)</b>	0.67	0.0035	0.01
<b>Arena (m3)</b>	0.67	0.0035	0.01
<b>Agua (L)</b>	190	1.04	2.57

Las características y dimensiones del acople superior que se muestran en la Figura 21 definen la cantidad de material necesario para su fabricación. Por lo cual, se requieren 45 cm de barra de refuerzo de  $\varnothing$  1-1/4", una lámina de 200x200 mm con un espesor de 3/8" que cumpla con la ASTM A992/A572 ("Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel 1," 2021; "Standard Specification for Structural Steel Shapes 1," 2022) Gr. 50. Además, se requieren 4 tuercas de alta resistencia y la mano de obra respecto a la perforación de la lámina, soldadura del elemento metálico y el enroscado de las dos varillas verticales inferiores del acople.

**Figura 21.**

*Dimensiones del acople superior*



Por otra parte, el acople inferior consiste en una barra corrugada de  $\varnothing 5/8''$  con una longitud de 170 mm y una cabeza hexagonal soldada en la parte superior, esto con el fin de cumplir las especificaciones de diseño.

Por último, para adherir la malla de fique al concreto se necesita un adhesivo, en este caso se utiliza 1 mm de espesor de resina epóxica de alta resistencia y una malla de fique de base 50 mm, cuya longitud ( $L_m$ ) varía de acuerdo con la longitud de adherencia ( $L_e$ ), dando como  $L_{m_{\min}} = 510$  mm y  $L_{m_{\max}} = 900$  mm. Con lo anterior, se obtiene el área de la malla de fique ( $BL \times L_m$ ) y el volumen de resina epóxica requeridos mostrados en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

*Cantidades para adherir la malla*

<b>Material</b>	<b>Cant min</b>	<b>Cant max</b>
Fique (m <sup>2</sup> )	0.0255	0.045
Resina (ml)	0.5	20

**7.2. Presupuesto**

Se cotizó el valor unitario de los materiales y servicios requeridos para elaborar los elementos del montaje experimental con varias empresas de Bucaramanga. Luego, se multiplicó por la cantidad necesaria y se recopilaron los datos en el Apéndice E.

De esta manera, el costo del ensayo inicial varía entre aproximadamente \$ 250.000 y \$ 260.000. Es importante destacar que el acople superior es reutilizable en cada prueba, lo que significa que los ensayos posteriores serán \$ 215.000 más económicos. Además, no se incluyó el valor del ensayo en la máquina universal ya que es propiedad de la universidad. De igual manera, la cámara, el trípode y la iluminación necesarios para realizar el ensayo ya están disponibles, por lo que se realizó una depreciación de estos elementos.

## 8. Conclusiones

Los montajes experimentales utilizados por los autores consultados para evaluar la adherencia entre el concreto y las mallas naturales o sintéticas son: corte simple, corte doble, extracción directa, flexión y mixto. Los más usados son los montajes a corte simple y corte doble, debido a su sencillez, y el montaje a flexión, debido a su aproximación al comportamiento in situ del elemento estructural. Por otra parte, el montaje de cortante simple requiere de estructuras especializadas para sujetar la probeta y controlar la excentricidad, elevando los costos de elaboración. Respecto al montaje de corte doble, su modelo convencional presenta excentricidad por desalineación y un gran tamaño y peso que lo hacen difícil de manejar, sin embargo, autores como (Mukhtar & Faysal, 2018) proponen una modificación del montaje que mitiga sus desventajas. En cuanto al montaje a flexión, el desprendimiento de la malla no es totalmente uniforme en toda la interfaz de adherencia y requiere de bisagras en la sección longitudinal a compresión, para evitar la concentración de tensiones en la zona inferior, esto complica la elaboración del montaje pues se deben fabricar dos probetas de concreto y garantizar la unión mediante la bisagra.

El montaje experimental seleccionado para ser utilizado en la Universidad Industrial de Santander (UIS) consiste en una variación del montaje para corte doble adaptado a la máquina universal de ensayos. La propuesta mitiga varias deficiencias que normalmente presenta el montaje convencional de cortante doble. Además, se diseñó un acoplamiento desmontable como adecuación al equipo disponible, lo que mejora practicidad, repetibilidad de ensayos y reduce costos. Y se propuso variar la longitud de adherencia con el fin de determinar la mínima entre la malla de fibra de fique natural y el concreto.

El costo total estimado de la ejecución del ensayo incluyendo la fabricación del montaje es menor que 260 mil según la longitud de adherencia utilizada entre el concreto y la malla de fierro. Este valor no incluye el costo del uso de la maquina universal de ensayos para la toma de datos, dado que la UIS ya cuenta con este equipo, por lo cual no representa un costo adicional para los integrantes de la universidad.

### Referencias Bibliográficas

- Al-Saoudi, A., Kalfat, R., & Al-Mahaidi, R. (2022). Investigation into the fatigue life of FRP strengthened concrete structures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 55(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01839-y>
- Al-Tamimi, A. K., Hawileh, R. A., Asce, M., Abdalla, J. A., Hayder, :, Rasheed, A., Asce, F., & Al-Mahaidi, R. (2014). *Durability of the Bond between CFRP Plates and Concrete Exposed to Harsh Environments*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943)
- Bennegadi, M. L., Hadjazi, K., Sereir, Z., Amziane, S., & el Mahi, B. (2016). General cohesive zone model for prediction of interfacial stresses induced by intermediate flexural crack of FRP-plated RC beams. *Engineering Structures*, 126, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.030>
- Chalot, A., Michel, L., & Ferrier, E. (2019). Experimental study of external bonded CFRP-concrete interface under low cycle fatigue loading. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 177). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107255>
- Dai, J., Ueda, T., & Sato, Y. (2005). Development of the Nonlinear Bond Stress–Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet–Concrete Interfaces with a Simple Method. *Journal of Composites for Construction*, 9(1), 52–62. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:1\(52\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:1(52))
- Diseño de mezclas de concreto para obras pequeñas \_ un aporte a la sostenibilidad ambiental.* (n.d.).
- Elbadry, M. M., Abdalla, H., & Ghali, A. (2000). Effects of temperature on the behaviour of fiber reinforced polymer reinforced concrete members: Experimental studies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5), 993–1004. <https://doi.org/10.1139/cjce-27-5-993>

- Fawzy, K., Hassan, H., & Madqour, M. (2021). Experimental and analytical investigations of reinforced concrete beams strengthened by different cfrp sheet schemes. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 15(56), 123–136. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.56.10>
- Ganguly, A., Shankar, S., Das, A., Shukla, M., Swaroop, C., & Bhardwaj, T. (2022). Natural fibre reinforced composites: A review based on additive manufacturing routes and biodegradability perspective. *Materials Today: Proceedings*, 62, 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.607>
- Ghorbani, M., Mostofinejad, D., & Hosseini, A. (2017). Experimental investigation into bond behavior of FRP-to-concrete under mixed-mode I/II loading. *Construction and Building Materials*, 132, 303–312. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.11.057>
- GOM Correlate Pro\_ Strains and displacements from motion pictures. (n.d.).
- Gravina, R. J., Hadigheh, S. A., & Setunge, S. (2014). Interfacial bond strength of resin-impregnated fibre-reinforced polymer laminates bonded to concrete using vacuum and heat: Experimental study. *Australian Journal of Structural Engineering*, 15(2), 189–202. <https://doi.org/10.7158/S13-014.2014.15.2>
- Habibullah, A. (n.d.). *Structure Analysis Program SAP 2000*.
- JG Teng, JF Chen, ST Smith, & L Lam. (2002). *FRP-strengthened RC Structures*.
- Laverde, V. (2023). Respuesta a compresión del concreto simple reforzado externamente con malla de fibra de fique [Manuscrito en proceso de publicación]. *Universidad Industrial de Santander*.
- Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340, 127729. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127729>

- Li, Y.-Q., Chen, J.-F., & Sha, W. (2019). *Effect of Coarse Aggregates on FRP Strain Distribution in an FRP-to-Concrete Bonded Joint SMarPlate (Funding scheme: H2020-MSCA-IF)-A ductile, high energy absorptive and rapid post-tensioning system for extending life of concrete structures* [View project](#) [SUS-CON](#) [View project](#).  
<https://www.researchgate.net/publication/336030495>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010a). *NSR-10-Título C*.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010b). *NSR-10-Título F*.
- Mivehchi, H., & Varvani-Farahani, A. (2010). The effect of temperature on fatigue strength and cumulative fatigue damage of FRP composites. *Procedia Engineering*, 2(1), 2011–2020.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2010.03.216>
- Moghaddas, A., Mostofinejad, D., & Ilia, E. (2019). Empirical FRP-concrete effective bond length model for externally bonded reinforcement on the grooves. *Composites Part B: Engineering*, 172, 323–338. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.068>
- Muhtar, Dewi, S. M., Wisnumurti, & Munawir, A. (2019). Enhancing bamboo reinforcement using a hose-clamp to increase bond-stress and slip resistance. *Journal of Building Engineering*, 26.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100896>
- Mukhtar, F. M., & Faysal, R. M. (2018). A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior. In *Construction and Building Materials* (Vol. 169, pp. 877–887). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.163>
- Prakash, S. O., Sahu, P., Madhan, M., & Johnson Santhosh, A. (2022). A Review on Natural Fibre-Reinforced Biopolymer Composites: Properties and Applications. In *International Journal of Polymer Science* (Vol. 2022). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2022/7820731>

- Sena-Cruz, J., Correia, L., Ribeiro, F., Figueira, D., Benzo, P. G., Barros, J., Pereira, E., & Valente, I. (2020). The effect of surface treatment and environmental actions on the adhesive connection between GFRP laminate surface and fresh FRC. *Construction and Building Materials*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119594>
- Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel 1. (2021). *ASTM A572/A572M*. [https://doi.org/10.1520/A0572\\_A0572M-21E01](https://doi.org/10.1520/A0572_A0572M-21E01)
- Standard Specification for Structural Steel Shapes 1. (2022). *ASTM A992/A992M-22*. [https://doi.org/10.1520/A0992\\_A0992M-22](https://doi.org/10.1520/A0992_A0992M-22)
- Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates 1. (2021). *ASTM D7522/D7522M*. [https://doi.org/10.1520/D7522\\_D7522M-21](https://doi.org/10.1520/D7522_D7522M-21)
- Sutton, M. A., & Hild, F. (2015). Recent Advances and Perspectives in Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 55(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-9991-6>
- Wan, B., Sutton, M. A., Petrou, M. F., Harries, K. A., & Li, N. (2004). Investigation of Bond between Fiber Reinforced Polymer and Concrete Undergoing Global Mixed Mode I/II Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(12), 1467–1475. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2004\)130:12\(1467\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2004)130:12(1467))
- Zhang, D., Gu, X. L., Yu, Q. Q., Huang, H., Wan, B., & Jiang, C. (2018). Fully probabilistic analysis of FRP-to-concrete bonded joints considering model uncertainty. *Composite Structures*, 185, 786–806. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.058>
- Zhang, F., Dai, J. G., Wang, Z., Wang, M., Leng, Y., & Xu, Q. (2021). Bond durability of epoxy and cement- bonded CFRP reinforcement to concrete interfaces subject to water immersion.

*Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 54(2). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01641-w>

Zhang, F., Wan, B., Xu, Q., Wang, M., Wang, Z., & Leng, Y. (2021a). Experimental study of bond behavior of laminated bamboo plate to concrete interfaces. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 54(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01616-x>

Zhang, F., Wan, B., Xu, Q., Wang, M., Wang, Z., & Leng, Y. (2021b). Experimental study of bond behavior of laminated bamboo plate to concrete interfaces. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 54(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01616-x>

Zhang, J., Li, Y., Liu, R., Xu, D., & Bian, X. (2018). Examining bonding stress and slippage at steel-bamboo interface. *Composite Structures*, 194, 584–597. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.037>

Zhang, P., Hu, Y., Pang, Y., Gao, D., Xu, Q., Zhang, S., & Ahmed Sheikh, S. (2020). Experimental study on the interfacial bond behavior of FRP plate-high-strength concrete under seawater immersion. *Construction and Building Materials*, 259, 119799. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119799>

Zheng, J.-J., Dai, J.-G., & Fan, X.-L. (2016). Fracture Analysis of FRP-Plated Notched Concrete Beams Subjected to Three-Point Bending. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001021](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001021)

Zhou, H., Fernando, D., Chen, G., & Kitipornchai, S. (2017). The quasi-static cyclic behaviour of CFRP-to-concrete bonded joints: An experimental study and a damage plasticity model. *Engineering Structures*, 153, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.007>

Zhou, H., Fernando, D., Thuan Nguyen, V., & Dai, J. G. (2021). The bond behaviour of CFRP-to-concrete bonded joints under fatigue cyclic loading: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121674>

### **Apéndices**

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