

Análisis numérico del comportamiento mecánico de elementos laminares de matriz cementicia
reforzados con malla de fique

Juan Felipe Cárdenas Pabón

Proyecto de grado para optar el título de ingeniero civil

Director

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ingeniero civil, PhD

Codirector

Oscar Javier Begambre Carrillo

Ingeniero civil, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, quien me ha permitido alcanzar cada meta en mi vida

A mis padres, por darme todo su amor y apoyo de manera incondicional

A toda mi familia por toda la confianza que depositaron en mi

A Manuel Felipe y Luisa Fernanda, por siempre estar ahí para darme una mano amiga

*Y a todos los que hicieron parte de este proceso por todos esos momentos especiales que vivimos
en esta gran etapa de nuestras vidas*

Juan Felipe Cárdenas Pabón

Agradecimientos

Agradecimientos a mi director y codirector de proyecto por todo su acompañamiento e instrucción durante el proceso de elaboración de esta investigación. Un agradecimiento especial al ingeniero David Sebastián Cotes Prieto, profesor de la escuela de ingeniería civil de la universidad industrial de Santander por toda la colaboración ofrecida en el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todos los profesores quienes hicieron parte de mi formación profesional con sus múltiples enseñanzas. A mis amigos por impactar de una manera positiva mi carrera universitaria y mi vida personal. Finalmente, agradecer a la Escuela de Ingeniería Civil y al Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) por brindarme el conocimiento y las herramientas necesarias para el desarrollo del presente proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2. Metodología y Materiales	14
2.1. Programas utilizados	14
2.1.1. Autodesk Inventor®.	14
2.1.2. ANSYS® Workbench.	17
2.2. Formulación del elemento	19
2.2.1. Restricciones definidas para el análisis.	20
2.3. Discretización de los elementos	21
2.4. Características del concreto	22
2.5 Características de la malla de refuerzo.....	23
2.6. Asignación de materiales.....	24
2.6.1. Concreto.....	24
2.6.2. Malla de refuerzo.....	27
3. Aplicación del modelo y resultados obtenidos	28
3.1. Elemento tipo viga	29

3.1.1. Resultados del modelo para el elemento tipo viga.	30
3.2 Elemento laminar	31
3.2.1. Resultados del modelo para el elemento laminar.....	32
4. Conclusiones	34
5. Recomendaciones.....	35
Referencias Bibliográficas.....	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema del montaje del experimento a cuatro puntos.	15
Figura 2. Geometría del elemento en Autodesk Inventor.	15
Figura 3. Mallas de Figue implementadas como refuerzo.	16
Figura 4. Geometría homogeneizada del refuerzo en Autodesk Inventor.....	17
Figura 5. Geometría de un elemento importada en ANSYS Workbench.	18
Figura 6. Orden de nodos para un elemento solido de 8 nodos.....	22
Figura 7. Curva esfuerzo contra deformación para el concreto empleado.....	25
Figura 8. Curva esfuerzo contra deformación del refuerzo de malla de fique.	27
Figura 9. Curvas esfuerzo-deformación de mallas ensayadas en laboratorio.....	28
Figura 10. Curva de carga contra deflexión para elementos viga.....	31
Figura 11. Curva de carga contra deflexión para elementos lamina de 30 mm.....	32
Figura 12. Curva de carga contra deflexión para elementos lamina de 40 mm.....	33
Figura 13. Curva de carga contra deflexión para elementos lamina de 50 mm.....	33

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Configuraciones de los especímenes tipo lamina modelados.	19
Tabla 2. Propiedades el concreto empleado en el análisis.	23
Tabla 3. Propiedades de la malla de refuerzo empleado en el análisis.	24
Tabla 4. Resultados obtenidos para los elementos tipo viga.	30
Tabla 5. Resultados obtenidos para los elementos tipo lamina.	32

Resumen

Título: Análisis numérico del comportamiento mecánico de elementos laminares de matriz cementicia reforzados con malla de fique.*

Autor: Cárdenas Pabón, Juan Felipe.**

Palabras Clave: Análisis numérico, Elementos laminares, fique, ANSYS.

Descripción:

En esta investigación se presenta el comportamiento de elementos laminares de matriz cementicia reforzados con mallas de fique. Los distintos especímenes sometidos a estudio se ensayaron a flexión mediante un análisis numérico realizado en el software ANSYS® Workbench que simula un ensayo a cuatro puntos de una viga simplemente apoyada, la cual es cargada a cada tercio de luz tal como está establecido en la norma I.N.V.E 414-13 y en la norma internacional ASTM C1609. Se determinaron las propiedades de los materiales empleados para las simulaciones teniendo en cuenta un comportamiento no lineal, tanto para la matriz cementicia como para el refuerzo elaborado con fibra de fique tejida con base información obtenida a partir de una revisión bibliográfica. También se plantearon parámetros sujetos a variaciones tales como la separación entre hilos de la malla de refuerzo empleado y el espesor de la placa, esto en pro de obtener respuestas provenientes de distintas configuraciones geométricas de los elementos. Además, se realizó una simulación de un elemento tipo viga para comparar el modelo con resultados obtenidos a partir de ensayos de laboratorio realizados con anterioridad. Los resultados del presente trabajo de investigación mostraron que la resistencia a flexión de los especímenes estudiados aumentó al comparar los elementos reforzados con aquellos que carecían de refuerzo.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, PhD. Codirector: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD.

Abstract

Title: Numerical analysis of the mechanical behaviour of cement-matrix laminar elements reinforced with fique mesh.*

Author: Cárdenas Pabón, Juan Felipe.**

Keywords: Numerical analysis, Laminar elements, Fique, ANSYS.

Description:

In this research, the behaviour of cement-matrix laminar elements reinforced with fique meshes is presented. The different specimens under study were tested by bending using a numerical analysis performed in the ANSYS Workbench software that simulates a four-point test of a simply supported beam, which is charged to each third of span, as established on the normative I.N.V.E 414-13 and the international normative ASTM C1609. The properties of the materials used for the simulations were determined considering non-linear behavior based on information obtained from a bibliographic review, both for the cement-matrix and the reinforcement made of fique fiber fabric. Parameters were subject to variations such as the separation between threads of the reinforcing mesh used and the thickness of the plate were also proposed, in order to obtain answers from different geometric configurations of the elements. In addition, a simulation of a beam-type element was performed to compare the model with results obtained from previous laboratory tests. The results of this research work showed that the bending resistance of the specimens studied increased when comparing the reinforced elements with those that lacked reinforcement.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Mechanical Physics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, PhD. Codirector: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD.

Introducción

En la construcción del concreto reforzado, los materiales mayormente empleados para el refuerzo de este son el acero y la fibra de carbono (Sun, Gao, Cao, & Zhou, 2019). Debido a la creciente preocupación por realizar actividades de forma sostenible, es decir, compatible con los recursos de la región, su renovabilidad y su bajo impacto ambiental a la hora de ser producidos; se ha optado por estudiar el efecto generado por refuerzos constituidos por fibras naturales gracias a su bajo costo y amplio rango de aplicaciones (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019) (González, Díaz-Ramírez, & Quiroga, 2018).

La alternativa para el refuerzo de concreto con fibras naturales, tomada en cuenta en el presente estudio, es el uso de un refuerzo tipo malla elaborado por medio de fibra de fique, siendo esta la planta de fibra más cultivada en Colombia, como exponen Delvasto et. al (Delvasto, Toro, Perdomo, & R., 2010). Su implementación como refuerzo es posible gracias al uso de técnicas de alcalinización que permiten una buena adherencia entre una matriz cementicia y las fibras naturales, obteniendo resultados favorables de resistencia y ductilidad. (Mina, 2012) (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019).

En el ámbito colombiano, el fique ha sido sometido a estudios previos para determinar su capacidad como refuerzo estructural (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019). Este material presenta un comportamiento no lineal por lo que se le considera un buen candidato como alternativa del refuerzo tradicional (González, Díaz-Ramírez, & Quiroga, 2018) (Enciso & Aldana, 2013).

Con el modelamiento numérico se estudia la respuesta mecánica de elementos, elementos de concreto reforzados con fibras naturales (NFRC por sus siglas en inglés), destacando en el análisis de materiales heterogéneos, como es el caso del concreto reforzado, evidenciado en las investigaciones realizadas por Barros et. al (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019), Puentes et. al (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019) y Enciso et. al (Enciso & Aldana, 2013). Asimismo, estos estudios muestran resultados favorables, teniendo en cuenta que el fique es un material fácil de aplicar, tiene bajo costo al tratarse de un recurso renovable. El material ha demostrado ser útil para el refuerzo de elementos de concreto, aumentando la capacidad a flexión de estos y mostrando una buena interacción con las matrices cementicias.

En el presente estudio se evalúa la incidencia de una malla de refuerzo interno de fique en elementos de matriz cementicia laminar, comparándola con una matriz sin refuerzo, empleando el software ANSYS® Workbench. Dichos elementos presentan distintas configuraciones geométricas tanto en la matriz como en el refuerzo, analizando distintas configuraciones de elementos que combinan estas características geométricas. Algunas de estas configuraciones han sido sometidas a ensayos en investigaciones previas realizadas en la Universidad Industrial de Santander (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019).

Para la realización del análisis no lineal física, también conocida como del material, en el presente trabajo se recurrió a la utilización del método de elementos finitos, específicamente elementos sólidos 3D, los cuales poseen 8 nodos y cuentan con tres grados de libertad en cada uno de ellos. El modelo constitutivo del concreto empleado en el presente estudio fue el de los autores Rodríguez y Linero (Pérez Serpa, 2017), este modelo fue planteado con el fin de analizar elementos de concreto simple sin características de confinamiento, por lo que resulta ideal para el tipo de elemento simulado en esta investigación. Las propiedades mecánicas del fique fueron

obtenidas a partir de estudios previos realizados sobre elementos reforzados con mallas de fibra de fique y fibras de este mismo material (Delvasto, Toro, Perdomo, & R., 2010) (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019) (Gómez, Alvarez, Gañan, & Vazquez, 2012). En la simulación se tuvo en cuenta el comportamiento plástico del compuesto para obtener resultados en el rango no lineal.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento mecánico de un elemento laminar de base cementicia reforzado con malla de fique mediante un análisis numérico estático no lineal.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer las variables mecánicas influyentes sobre el comportamiento de elementos laminares de concreto reforzados con malla de fique en un análisis no lineal.
- Seleccionar el modelo numérico más adecuado analizando información bibliográfica y variables de estudio establecidas, realizando las modificaciones pertinentes para los fines del presente proyecto.
- Aplicar el modelo representativo propuesto para un análisis numérico del comportamiento de los elementos laminares de concreto reforzados con mallas de fique.

2. Metodología y Materiales

2.1. Programas utilizados

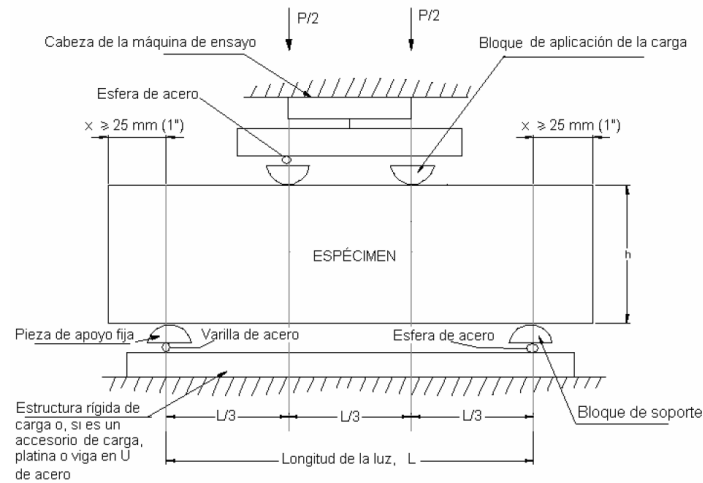
En este trabajo se implementaron principalmente dos programas para modelar y analizar la respuesta de los elementos de estudio: Autodesk® Inventor® (Autodesk, Inc., 2019) y ANSYS® Workbench (Swanson Analysis Systems, Inc., 2020).

2.1.1. Autodesk Inventor®.

Inventor® es un programa CAD, Diseño asistido por computadora, utilizado para el modelamiento tridimensional de cuerpos sólidos, diseño mecánico y simulación de productos. El programa se empleó para definir la geometría de los componentes del material compuesto: tanto la matriz cementicia como la malla de fique. Los elementos de concreto se dividieron en seis tramos distintos con el fin de simular el experimento mostrado en la norma del Instituto Nacional de vías, I. N. V. E – 414-13 “Resistencia a la flexión del concreto: Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz” (Instituto Nacional de Vias, 2014) (figura 1), y la norma internacional ASTM C1609/C169M-12 (American Society for Testing and Materials ASTM International, 2012).

Figura 1.

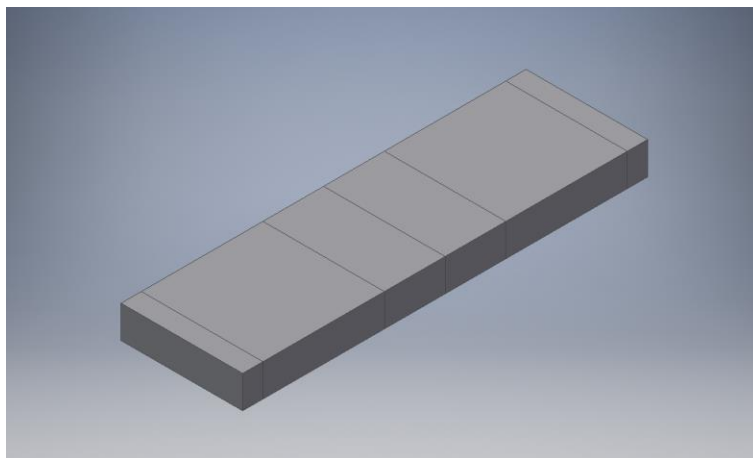
Esquema del montaje del experimento a cuatro puntos.



Nota. Tomado de: Instituto Nacional de Vías (2014) “I. N. V. E – 414-13 Resistencia a la flexión del concreto: Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz”, Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, secc. 400, , p. 181-185.

Figura 2.

Geometría del elemento en Autodesk Inventor.



Para la geometría de la malla de fique se optó por una homogeneización de ésta, modelando una placa delgada, manteniendo el área con respecto a las mallas implementadas en los ensayos previos (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019) (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019). Las dimensiones de esta placa que se utilizará como refuerzo de 100 [mm] de ancho por 450 [mm] y 5 [mm] de espesor, el cual es equivalente al diámetro de los hilos de fique utilizado es de 5 [mm], dicho diámetro fue el propuesto en el estudio elaborado por Puentes et. al. (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019) (Figuras 3 y 4).

Figura 3.

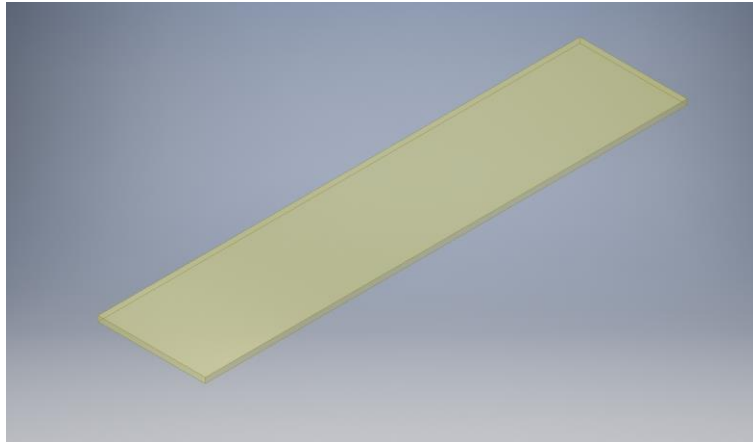
Mallas de Fique implementadas como refuerzo.



Nota. Tomado de: Puentes, R.; Soto, A. J.; Díaz G. A.; & Cruz, R. (2019)“*Mechanical Behaviour of Composite Material Based on Mortar / natural fibers (fique ‘furcraea andina’) Meshes as External Reinforcement of Concrete Beams*”, pp. 1-8.

Figura 4.

Geometría homogeneizada del refuerzo en Autodesk Inventor.



La geometría de los elementos así modelada se importa al programa ANSYS® Workbench para realizar la simulación del experimento a cuatro puntos (Instituto Nacional de Vias, 2014) (American Society for Testing and Materials ASTM International, 2012).

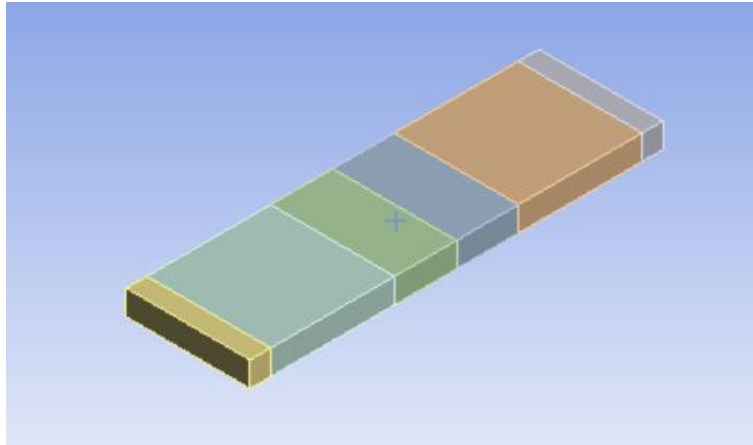
2.1.2. ANSYS® Workbench.

ANSYS® es un paquete de software, que realiza análisis de elementos finitos y permite resolver una gran variedad de problemas de mecánica de sólidos. El presente trabajo se enfoca en la realización de un análisis estático no lineal del material compuesto, por lo que resulta provechoso la implementación de este programa para el estudio de los elementos de concreto reforzado con fique.

El software es alimentado con las características geométricas importadas de inventor (figura 5) y con las propiedades mecánicas de los materiales, que se presentan para cada material empleado en el compuesto, en las secciones 2.3 y 2.4 de este trabajo.

Figura 5.

Geometría de un elemento importada en ANSYS Workbench.



Las variables de interés a analizar sobre la respuesta mecánica del compuesto son el espesor de la placa, ya que este parámetro es de gran influencia en la respuesta obtenida por este tipo de elementos (Gallegos, 2008) y la separación de los hilos de la malla pues el efecto de esta separación ha sido analizado en investigaciones previas (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019) (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019). Para comparar el efecto de dichas variables se optó por el modelado de distintos tipos de elementos. Dichos elementos cuentan con tres espesores distintos de lámina reforzada y con diferentes separaciones entre hilos de malla. Además, se modelaron tres elementos adicionales que carecen de refuerzo. Esto con el fin de comparar la respuesta con los elementos reforzados. Otra consideración en el análisis realizado es que los elementos se encuentran simplemente apoyados y sometidos a flexión por dos cargas puntuales ubicadas a los tercios de la luz de los elementos, simulando el experimento realizado por Puentes et. al (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019).

2.2. Formulación del elemento

Los elementos analizados en el presente estudio fueron laminas con espesores (h) de 30 [mm], 40 [mm] y 50 [mm] y cuyo refuerzo presenta separaciones entre los hilos del refuerzo (S) de 3 [mm], 5 [mm] y 8 [mm], cada una de estas configuraciones de refuerzo presenta propiedades distintas en su comportamiento mecánico como su módulo de elasticidad y su curva esfuerzo deformación. El ancho y la longitud de los especímenes es de 150 [mm] y 500 [mm] respectivamente para todos los especímenes elaborados; estas dimensiones son iguales a las evaluadas por Puentes et. al (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019), en la Universidad Industrial de Santander, buscando comparar los resultados experimentales con los numéricos. Los espesores se escogieron teniendo en cuenta los más utilizados en el diseño y construcción de mobiliario urbano en el sector.

Para determinar el efecto producido por la variación de la configuración de los elementos se elaboraron nueve especímenes reforzados y tres sin refuerzo en la tabla 1.

Tabla 1.

Configuraciones de los especímenes tipo lamina modelados.

Espécimen	Espesor (mm)	Refuerzo	Separación entre hilos (mm)
A	30	SI	3
B	30	SI	5
C	30	SI	8
D	40	SI	3
E	40	SI	5
F	40	SI	8
G	50	SI	3

Espécimen	Espesor (mm)	Refuerzo	Separación entre hilos (mm)
H	50	SI	5
I	50	SI	8
J	30	NO	N/A
K	40	NO	N/A
L	50	NO	N/A

2.2.1. Restricciones definidas para el análisis.

Los elementos analizados en el presente proyecto se simularon como simplemente apoyados en sus extremos con una articulación en el extremo A y un apoyo simple en el extremo B.

Los elementos del modelo se cargaron con dos cargas puntuales, posicionadas cada una a un tercio de luz de los apoyos (Instituto Nacional de Vias, 2014). Se determinó la respuesta a flexión de los elementos laminares de espesor variable y del elemento tipo viga de sección transversal de 150x150 [mm], obteniéndose curvas de carga contra deflexión.

Con el fin de considerar el contacto entre la malla y el material cementicio se optó por simular una adherencia perfecta entre ellos, al igual que para la unión de los distintos tramos de la matriz, para lo cual se implementó el tipo de contacto denominado “Bonded”. Se optó por implementar esta simplificación ya que en las diferentes investigaciones previas de elementos reforzados con fibras naturales presentan una buena adherencia (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019) (González, Díaz-Ramírez, & Quiroga, 2018) (Delvasto, Toro, Perdomo, & R., 2010) (Mina, 2012) (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019)(Enciso & Aldana, 2013).

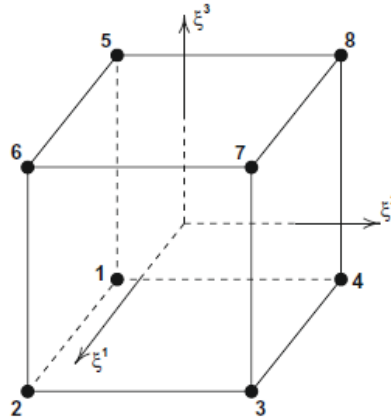
2.3. Discretización de los elementos

En las simulaciones se empleó el método de elementos finitos, esto significa que los compuestos sometidos a estudio presentan una discretización por medio de un enmallado uniforme, simétrico y de una calidad significativa. Para ejercer un control sobre estos parámetros se implementó una calidad promedio de elementos igual o mayor a 0.8; en el software, esta métrica hace referencia a la relación que existe entre las dimensiones del borde de los elementos y el volumen de estos. Siendo el valor de 1 el equivalente un cubo perfecto.

Se optó por el uso de elementos tipo ladrillo basados en la teoría planteada por Zienkiewicz et. al. (Zienkiewicz, Taylor, & Fox, 2014, pág. 103) ejemplificado en la figura 6. En el software ANSYS® Workbench este tipo de elemento es generado como el SOLID185, el cual se utiliza para modelar estructuras sólidas y está delimitado por 8 nodos que cuentan con tres grados de libertad: traslación en cualquiera de las tres direcciones X, Y y Z. Este elemento es particularmente útil para analizar el comportamiento no lineal de los materiales y para simulación de elementos de concreto (Swanson Analysis Systems, Inc, 2020).

Figura 6.

Orden de nodos para un elemento solido de 8 nodos.



Fuente: Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; & Fox, D. D. (2014) “*The Finite Element Method for Solid & Structural Mechanics*”, Séptima Edición, Butterworth-Heinemann, Waltham, MA p. 103, Apéndice A.

2.4. Características del concreto

El material seleccionado para la conformación de la matriz cementicia fue concreto simple de resistencia a la compresión de 21 [MPa], misma resistencia empleada en los ensayos de laboratorio realizado por Puentes et. al (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019) en su estudio de elementos reforzados con malla de fique. Las propiedades introducidas en ANSYS® Workbench para realizar el análisis son las mostradas en la tabla 2.

La densidad y coeficiente de Poisson del concreto son valores promedio empleados para el análisis numérico de este material tomados de distintos estudios realizados anteriormente por autores como Rodríguez y Linero (Rodríguez & Linero, 2012).

El módulo de elasticidad (E_c) del concreto empleado se calculó haciendo uso de la ecuación 1, estipulada en el comentario del numeral C.8.5 de la NSR-10 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

$$E_c = 3900 * \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Donde f'_c es la resistencia a la compresión del concreto anteriormente mencionada. El módulo de cortante y módulo de compresibilidad son automáticamente calculados por ANSYS® Workbench, una vez son suministrados los valores del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Tabla 2.

Propiedades el concreto empleado en el análisis.

Propiedad	Valor
Densidad	$2300 \frac{kg}{m^3}$
Módulo de elasticidad	$1.74E+10$ Pa
Coeficiente de Poisson	0.20
Módulo de cortante	$7.25E+09$ Pa
Módulo de compresibilidad	$9.667E+09$ Pa

2.5 Características de la malla de refuerzo

Las propiedades del material de refuerzo fueron obtenidas de la revisión bibliográfica realizada (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019) (Delvasto, Toro, Perdomo, & R., 2010). En la tabla 3, se presentan las propiedades del material introducidas en ANSYS® Workbench. La separación entre hilos de refuerzo se denomina con la letra S.

Tabla 3.

Propiedades de la malla de refuerzo empleado en el análisis.

Propiedad		Valor
Densidad		$723 \frac{kg}{m^3}$
Módulo de elasticidad	S3	2.71E+10 Pa
	S5	1.82E+10 Pa
	S8	1.42E+10 Pa
Coeficiente de Poisson		0.25
Módulo de cortante		8.82E+09 Pa
Módulo de compresibilidad		1.47E+10 Pa

El coeficiente de Poisson se obtuvo de las pruebas realizadas a mallas de fique con anterioridad por Barros et. al. (González, Díaz-Ramirez, & Quiroga, 2018). Las distintas separaciones de mallas otorgan distintas resistencias a la tensión a los tipos de refuerzo analizados de 767.76 [MPa], 621.25 [MPa] y 483.02 [MPa] para las mallas con separación entre hilos de 3 [mm], 5 [mm] y 8 [mm] respectivamente, obtenidos de la caracterización realizada por Puentes et. al. (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019).

2.6. Asignación de materiales

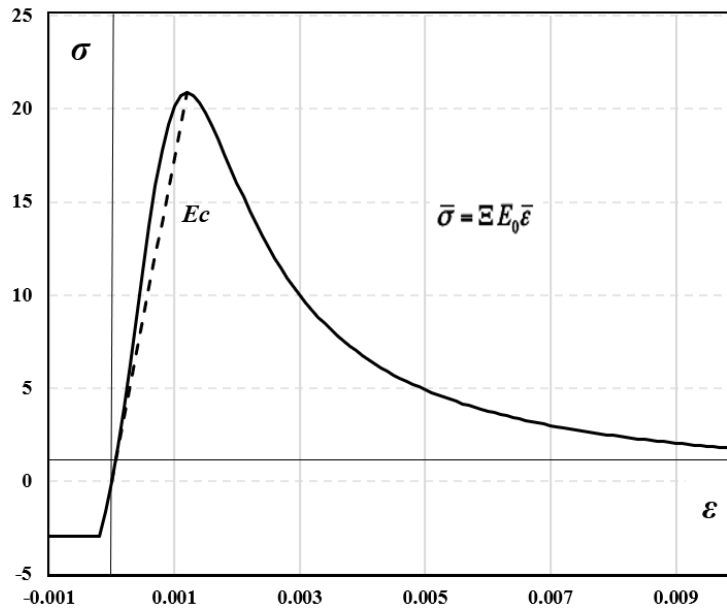
2.6.1. Concreto.

El modelo constitutivo implementado fue el propuesto por Rodríguez y Linero para el concreto simple (Rodríguez & Linero, 2012). La curva elaborada para el concreto empleado en este estudio se presenta en la figura 7, en donde los valores dentro del primer cuadrante

determinan el comportamiento a compresión, mientras que los valores dentro del tercer cuadrante el comportamiento a tensión. Como ilustra la figura 7, la curva no es completamente lineal antes de alcanzar el esfuerzo máximo a la compresión. Se utilizó un modelo lineal hasta la resistencia f'_c y para la capacidad residual se usó el modelo planteado por Rodríguez y Linero.

Figura 7.

Curva esfuerzo contra deformación para el concreto empleado.



El comportamiento a compresión del modelo para concreto simple implementada evidencia que a partir del momento en el que el concreto alcanza su esfuerzo máximo se presenta una pérdida gradual de resistencia. La curva presentada en la sección a compresión de la figura 7 está determinada por la ecuación 2.

$$\sigma_c = \Xi E_c \epsilon \quad (2)$$

Siendo el termino E_c es el módulo de elasticidad del concreto y el termino Ξ (Ξ) está determinado por la ecuación 3.

$$\Xi = \frac{1}{\left[1 - \frac{11}{12}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) + \frac{10}{12}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 + \frac{1}{12}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^3\right]} \quad (3)$$

Donde ε es la deformación presentada por el concreto y ε_0 es la deformación donde el concreto alcanza su esfuerzo máximo. Este valor fue determinado haciendo uso de la ecuación 4.

$$\varepsilon_0 = \frac{f_{rc}}{3900 * \sqrt{f'_{rc}}} \quad (4)$$

En la sección a tensión se considera un comportamiento bilineal que comienza con una pendiente de E_c hasta el valor límite determinado con la ecuación 4. Esto con el fin de simular un comportamiento real del concreto, basado en la sección C.18.4 “Requisitos de funcionamiento – Elementos sometidos a flexión” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). el cual posee una resistencia a la tensión aproximada del 10% comparada con la resistencia a compresión. En los estudios realizados por Puentes et. al (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019), se determinó que la deformación límite del concreto es de 0.016 [mm/mm].

$$\sigma_t = 0.62 * \sqrt{f'_{rc}} \quad (5)$$

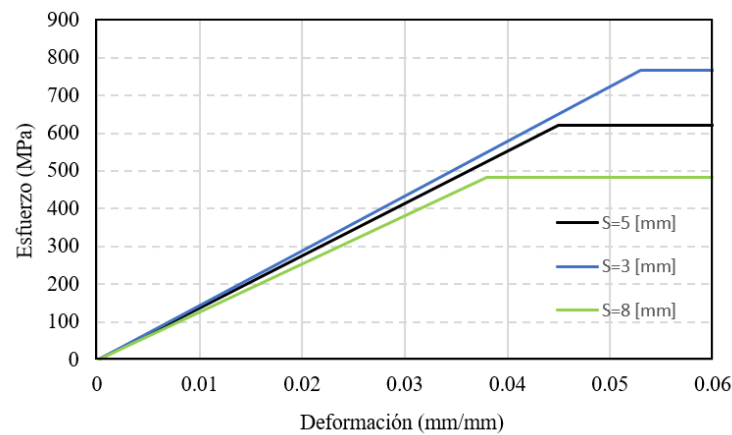
Para introducir dicho comportamiento a ANSYS® Workbench, se utilizaron propiedades geomecánicas de Menetrey-William. Para la implementación de dichas propiedades mecánicas se requiere dar información acerca de la fuerza de compresión y tensión uniaxial del concreto, además de la resistencia biaxial del concreto. Dicho comportamiento fue determinado basándose en el estudio realizado por Kupfer et. al (Kupfer, Hilsdorf, & Rusch, 1969); donde se expresa que la resistencia a la compresión biaxial es del orden de un 27% mayor a la resistencia a la compresión uniaxial.

2.6.2. Malla de refuerzo.

En el presente análisis se consideró un comportamiento bilineal elasto-plástico para la malla de refuerzo de fique basado en la caracterización del material obtenida de la revisión bibliográfica (Barros, Gamboa, Díaz-Ramírez, González, & Cruz, 2019) (Mina, 2012). Este tipo de comportamiento es el presentado en la figura 9.

Figura 8.

Curva esfuerzo contra deformación del refuerzo de malla de fique.

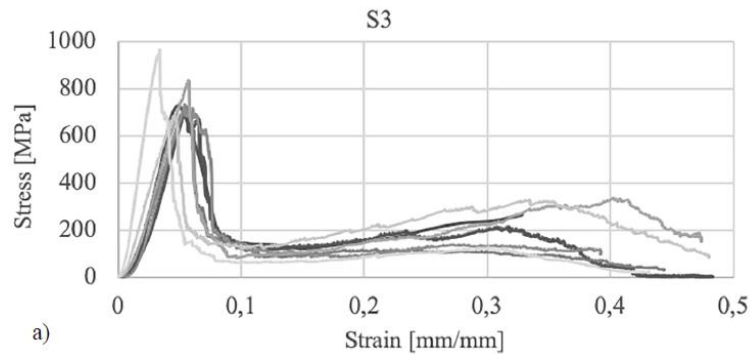


ANSYS® Workbench permite la implementación de este modelo usando una función denominada “Bilinear Isotropic Hardening”, en el que se determina la resistencia máxima del refuerzo y el módulo tangente, el cual para los fines de este estudio se consideró de 0 [MPa] para que el comportamiento sea elástico perfectamente plástico (Delvasto, Toro, Perdomo, & R., 2010). El comportamiento en el tramo previo a la resistencia máxima es similar a las caracterizaciones presentadas por Puentes et. al (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019). En el estudio anteriormente mencionado se determinaron los valores límite de deformación de las mallas de entre 0.4 a 0.5

[mm/mm], las curvas obtenidas para una malla de separación entre hilos de 3 [mm] en ensayos de laboratorio se presentan en la figura 10.

Figura 9.

Curvas esfuerzo-deformación de mallas ensayadas en laboratorio.



Nota. Tomado de: Puentes, R.; Soto, A. J.; Díaz G. A.; & Cruz, R. (2019) “*Mechanical Behaviour of Composite Material Based on Mortar / natural fibers (fique ‘furcraea andina’) Meshes as External Reinforcement of Concrete Beams*”, pp. 1-8.

3. Aplicación del modelo y resultados obtenidos

Una vez definidos los materiales del compuesto sometido a análisis, se procedió a realizar las respectivas simulaciones de los modelos correspondientes con el fin de determinar el efecto en la respuesta mecánica comparando elementos reforzados con elementos sin reforzar.

Se realizó un análisis de convergencia donde se probaron distintos tamaños de enmallado y pasos de carga hasta llegar a una configuración donde se consiguiera convergencia en la respuesta obtenida, dicha configuración fue de un tamaño de elemento de 10 [mm] y un paso de carga de 50 N. La aplicación de carga está en función de una variable denominada “time”, para un análisis estático esta variable es considerada como ficticia (Zienkiewicz, Taylor, & Fox, 2014, pág. 103) y está determinada por la cantidad de pasos de la simulación. El software implementa un método iterativo (Newton-Raphson) para resolver el problema de equilibrio y determinar la respuesta de los distintos tipos de elementos simulados. Estos fueron sometidos a incrementos de carga hasta que el elemento llegara a su máxima capacidad.

El análisis en este estudio fue controlado por la carga y el nodo de control empleado fue el nodo a mitad de luz del elemento en el cual se midieron las deflexiones mediante el uso de un “Deformation Probe”. De igual manera se configuró el software para que tuviera en cuenta las deformaciones grandes que presentaran los elementos.

3.1. Elemento tipo viga

Para determinar si el efecto del refuerzo se presenta en distintos tipos de geometrías, se realizaron ensayos para varios tipos de elementos, incluyendo un elemento tipo viga de sección 150x150 [mm] (Ver sección 2.2). Las cargas ultimas soportadas por los elementos en la simulación de un ensayo a cuatro puntos se presentan en la tabla 4. La columna “Carga” presenta el valor total de carga, la mitad de esta fue aplicada a una distancia de un tercio de la luz de cada apoyo.

Tabla 4.

Resultados obtenidos para los elementos tipo viga.

Elemento	Carga (N)	Deflexión (mm)
Sin Refuerzo	12000	0.05249
Con Refuerzo	16200	0.16008

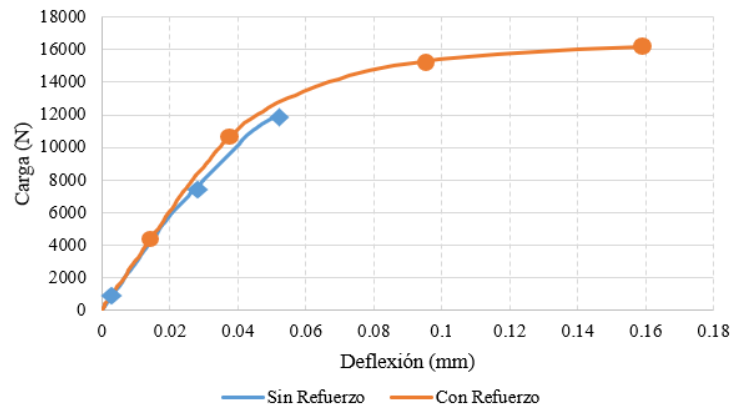
La carga soportada por el elemento presenta un aumento del 35%. El valor de carga del elemento reforzado se comparó con el obtenido en ensayos realizados con anterioridad en la universidad industrial de Santander (Puentes, Soto, Díaz, & Cruz, 2019), donde se obtuvo que este resistía una carga de 18037 N. La discrepancia es de aproximadamente 10% con respecto a la obtenida en la simulación del elemento viga.

3.1.1. Resultados del modelo para el elemento tipo viga.

Se graficaron las curvas de carga contra deflexión para los elementos vigas con un refuerzo de separación entre hilos de refuerzo de 5 [mm] y un elemento sin refuerzo con el fin de comparar el comportamiento de ambos tipos de vigas a lo largo de todo el proceso de carga como se presenta en la figura 10.

Figura 10.

Curva de carga contra deflexión para elementos viga.



El material que controla la falla en las curvas es el concreto, debido a su poca resistencia a la tracción. Los elementos analizados no presentan un aumento significativo en su rigidez. Sin embargo, muestran una mayor capacidad de resistir carga y de deformarse.

3.2 Elemento laminar

Para el análisis de elementos laminares de emplearon los tres tipos de espesores mencionados en la sección 2.2 de este artículo y se realizó una comparación entre elementos no reforzados con elementos que presentan un refuerzo con malla de fique. Al igual que con el elemento viga de sección 150x150 [mm].

Los valores obtenidos de carga y deflexión al simular los distintos se muestra en la tabla 5. El refuerzo empleado en los elementos de dicha tabla fue de una separación de 5 [mm] entre hilos.

Tabla 5.

Resultados obtenidos para los elementos tipo lamina.

Espesor (mm)	Condición	Carga (N)	Deflexión (mm)
30	Sin Refuerzo	1200	0.44174
	Con Refuerzo	1500	0.56372
40	Sin Refuerzo	2000	0.29585
	Con Refuerzo	2500	0.32446
50	Sin Refuerzo	3250	0.24966
	Con Refuerzo	4000	0.31993

3.2.1. Resultados del modelo para el elemento laminar.

Para los tres tipos de espesores analizados también se graficaron las curvas carga contra deflexión que muestran el comportamiento de los elementos. Dicha respuesta se presenta en las figuras 10, 11 y 12.

Figura 11.

Curva de carga contra deflexión para elementos lamina de 30 mm.

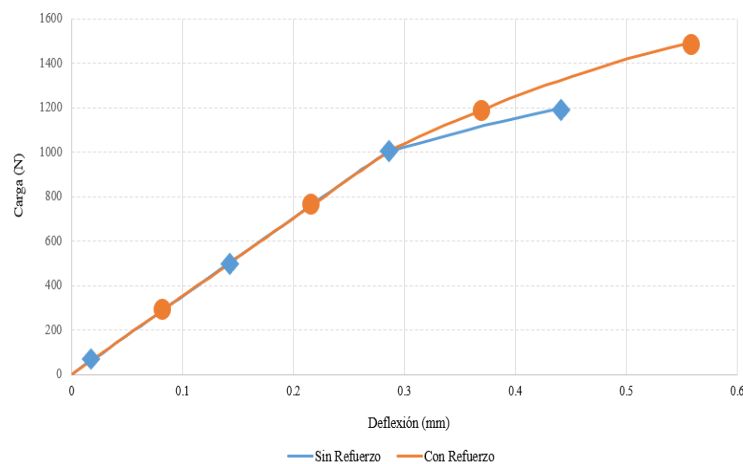
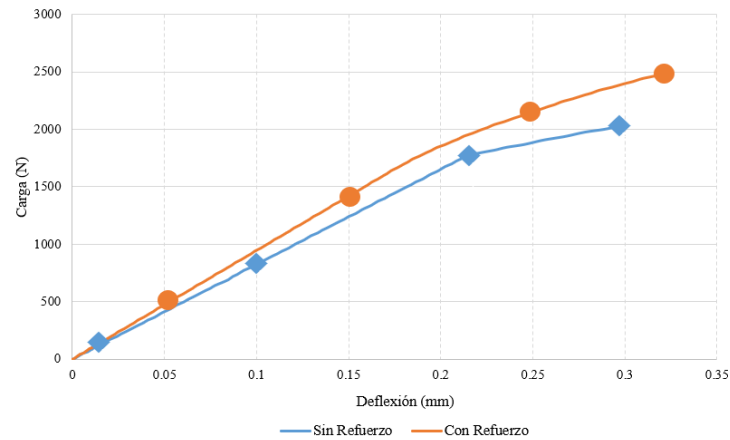
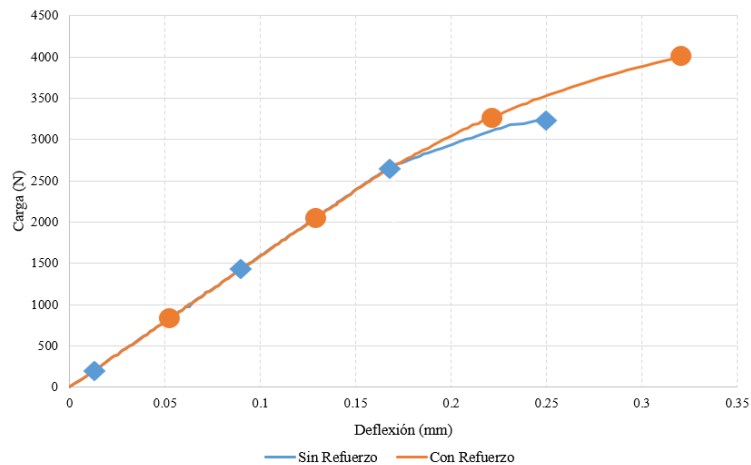


Figura 12.

Curva de carga contra deflexión para elementos lamina de 40 mm.

**Figura 13.**

Curva de carga contra deflexión para elementos lamina de 50 mm.



De igual manera que para el elemento tipo viga de sección 150x150 [mm] se midió la deflexión en uno de los nodos presentes en la mitad de la luz de los distintos elementos tipo lamina y el material que controla la falla es el concreto a tracción.

Dentro del rango elástico se aprecia que tanto los elementos reforzados como aquellos que no presentan refuerzo alguno tienen un comportamiento muy similar. No es sino hasta que los elementos entran al rango no lineal que se puede apreciar el efecto producido por el refuerzo elaborado con malla de fique.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio se determinaron las siguientes conclusiones:

Mediante un análisis numérico se realizó una caracterización de los compuestos con distintas configuraciones de espesor y separación de hilos, elaborando los modelos propuestos haciendo uso de software Autodesk Inventor para el modelamiento de la geometría de los elementos. Se implementó el programa ANSYS® Workbench para la realización de simulaciones de un ensayo de cuatro puntos basado en la normativa del Instituto Nacional de Vías I.N.V.E 414-13 del Instituto Nacional de Vías (Instituto Nacional de Vías, 2014) y la norma internacional ASTM C1609/C169M-12 (American Society for Testing and Materials ASTM International, 2012).

En segunda instancia, se estableció que las variables influyentes para el análisis de los elementos serían la separación entre hilos de la malla de refuerzo y el espesor de los elementos tipo lámina. Sin embargo, la separación entre los hilos de la malla no evidencia un efecto en el comportamiento de los elementos sometidos a estudio en el presente proyecto. Además, el aumento

de sección transversal de los elementos afecta en gran medida la resistencia del compuesto a las cargas, este aumento de sección causa que las deflexiones en el centro de la luz sean menores con respecto a los elementos de menor espesor (Gallegos, 2008).

Por otra parte, realizando una revisión bibliográfica se seleccionó un modelo numérico adecuado para la simulación de los elementos de acuerdo con los fines del presente estudio, teniendo en cuenta los tipos de materiales empleados y determinando un comportamiento no lineal tanto para la matriz cementicia como para el refuerzo de fique.

De acuerdo con los resultados presentados por los elementos que carecen de refuerzo en comparación con aquellos que fueron reforzados con mallas de fique, se observa un aumento en la resistencia a las cargas aplicadas; este aumento es del 35% para el elemento tipo viga y en promedio un 24% para los elementos tipo lámina, además de que los elementos simulados presentan una mayor capacidad para deformarse de entre 8% y 32%.

Por consiguiente, al aplicar el modelo numérico propuesto se logró determinar que la implementación de una malla de fique como refuerzo para elementos de concreto produce efectos en tanto en su resistencia y deformabilidad. Animando a la realización de futuras investigaciones sobre compuestos de similares características.

5. Recomendaciones

El presente estudio concluyó que la separación entre hilos de la malla no afecta en gran medida a la respuesta mecánica de los compuestos analizados. Para futuras investigaciones se

recomienda realizar modelos geométricos del refuerzo con mayor detalle o la implementación de modelos constitutivos más específicos para simular el comportamiento de los materiales y del contacto concreto-fique, de tal manera que sea posible conseguir resultados más precisos sobre la relación entre la separación de hilos y la matriz cementicia y los efectos de esta sobre este tipo de compuestos.

Referencias Bibliográficas

- American Society for Testing and Materials ASTM International. (2012). *ASTM C1609/C1609M-12: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- Autodesk, Inc. (2019). *Autodesk Inventor Professional 2019*.
- Barros, F. A., Gamboa, J. M., Díaz-Ramírez, G. A., González, O. A., & Cruz, R. A. (2019). Numerical and experimental study of flexural behaviour in polymer composite materials reinforced with natural fique textiles. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1247, 1-6.
- Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & R., M. d. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, no. 24, 187-192.
- Enciso, J. L., & Aldana, D. A. (2013). Simulación de impacto a mallas de fibras de fique y guadua como refuerzo de un compuesto polimérico. *Revista Colombiana de Materiales* N. 5, 139-144.
- Gallegos, S. (2008). *Análisis de sólidos y estructural mediante el método de elementos finitos*. México: Limusa.
- Gómez, C., Alvarez, V. A., Gañan, P., & Vazquez, A. (2012). Fique Fibers: Enhancement of the Tensile Strength of Alkali Trated Fibers During Tensile Load Application. *Fibers and Polymers*, vol. 13, no. 5, 632-640.
- González, O. A., Díaz-Ramírez, G. A., & Quiroga, J. (2018). Mechanical Response and Damage of Woven Composite Materials Reinforced with Fique. *Key Engineering Materials, Trans Tech Publications*, 143-148.

- Instituto Nacional de Vías. (2014). I. N. V. E – 414-13 Resistencia a la flexión del concreto: Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz”. *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*, secc. 400.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., & Rusch, H. (1969). Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. *ACI Journal*, Title No. 66-52, 656-666.
- Mina, J. H. (2012). Caracterización Físico-Mecánica de un Análisis Interfacial con Fibras de Fique, Biotecnología. en el sector. . *Agropecuaria y Agroindustrial*, vol. 10, no. 2, 99-109.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. *Título C*, 112-315.
- Pérez Serpa, B. (2017). *Introducción al Análisis No Lineal de Estructuras: Texto del curso Análisis No Lineal de Estructuras. Primera edición*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Puentes, R., Soto, A. J., Díaz, G. A., & Cruz, R. (2019). *Mechanical Behaviour of Composite Material Based on Mortar / natural fibers (fique ‘furcraea andina’) Meshes as External Reinforcement of Concrete Beams*.
- Rodríguez, L., & Linero, D. (2012). Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos mediante la teoría de plasticidad y función de fluencia de Hu y Schnobrich. *Revista ingeniería de construcción*, vol.27 no.3, 130-144.
- Sun, X., Gao, Z., Cao, P., & Zhou, C. (2019). Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, no. 202, 58-72.
- Swanson Analysis Systems, Inc. (2020). *ANSYS® Workbench Versión 2020 R2 Mechanical User’s Guide “SOLID185”*.
- Swanson Analysis Systems, Inc. (2020). *Workbench 2020 R2*.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox, D. D. (2014). *The Finite Element Method for Solid & Structural Mechanics Séptima Edición*, Butterworth-Heinemann, Waltham, MA.