

Uso de Fibras Vegetales como Reforzamiento Estructural en
Materiales Compuestos de Matriz Cementosa: Estado del Arte

Angie Dayanna Marin Medina y Valeria Laverde Sarmiento

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Civil e Ingeniera Metalúrgica

Director

José Miguel Benjumea Royero
Dr. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector

Mauricio Rincón Ortiz
Dr. en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander
Facultades de Ingenierías Fisicomecánicas y Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Civil e Ingeniera Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2020

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	7
1.Objetivos	9
1.1 Objetivo General	9
1.2 Objetivos Específicos.....	9
2. Fibras Vegetales	10
2.1 Sisal	12
2.2 Lino	12
2.3 Cáñamo	12
2.4 Eucalipto	13
2.5 Coco	13
2.6 Yute	13
2.7 Fique.....	14
2.8 Composición Química y Propiedades Mecánicas de las Fibras Vegetales.....	14
3. Tratamientos Superficiales.....	18
3.1 Alcalinización	19
3.2 Silanización.....	20
3.3 Hornificación	21
3.4 Carbonatación acelerada	21
3.5 Adiciones Puzolánicas: Humo de Sílice	22
4. Propiedades Mecánicas de Compuestos Cementosos Reforzados con Fibras Vegetales	27
5. Aplicaciones de las Fibras Vegetales en Materiales Compuestos de Matriz Cementosa	34
5.1 Elementos Estructurales Primarios	34
5.2 Elementos Estructurales Secundarios	37
6. Conclusiones	40
Referencias Bibliográficas	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Porcentajes de composición de las fibras	15
Tabla 2. Rango de propiedades mecánicas y humedad de cada fibra	16
Tabla 3. Efecto de tratamientos superficiales de las fibras en las propiedades mecánicas de los compuestos.....	24
Tabla 4. Efecto de los tratamientos en las matrices cementosas en las propiedades mecánicas de los compuestos.....	26

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Revisión de estudios relacionados con el refuerzo de fibras vegetales en matrices cementosas	8
Figura 2. Aplicación de fibras naturales	11
Figura 3. Composición de las fibras naturales	15
Figura 4. Revisión sobre el uso de tratamientos superficiales en compuestos de matriz cementosa.	25
Figura 5. Influencia de la inclusión de las fibras en el agrietamiento de la matriz cementosa.....	28
Figura 6. Efecto de la longitud de las fibras sobre el comportamiento mecánico de los compuestos reforzados.....	31
Figura 7. Aplicaciones de refuerzo de fibras de sisal en elementos matrices de concreto	35

Resumen

Título: Uso de fibras vegetales como reforzamiento estructural en materiales compuestos de matriz cementosa: Estado del arte*

Autor: Angie Dayanna Marín Medina, Valeria Laverde Sarmiento**

Palabras Clave: Fibras Vegetales, Compuestos de Matriz Cementosa, Refuerzo, Tratamientos Superficiales, Elementos Estructurales, Propiedades Mecánicas.

Descripción:

Con el tiempo, la búsqueda de sostenibilidad en el uso de materiales de construcción ha fomentado el interés por el uso de fibras vegetales como refuerzo de compuestos de matriz cementosa. Estas fibras son renovables, de bajo costo y ofrecen beneficios como ligereza, rigidez, biodegradabilidad y alta resistencia al impacto. Este proyecto tiene como objetivo presentar una revisión de las investigaciones realizadas durante los últimos 20 años enfocadas en el uso de fibras vegetales como refuerzo de matrices cementosas. Para ese fin, se seleccionaron las fibras más utilizadas, los métodos para mejorar las propiedades de los compuestos y durabilidad de la fibra, el comportamiento mecánico de los componentes reforzados y sus aplicaciones en elementos estructurales. Evidenciando que, a pesar de los beneficios que brindan las fibras en las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados, aun es escasa la información relacionada con la durabilidad de las fibras en matrices cementosas, por lo cual el uso de este tipo de refuerzo en elementos estructurales primarios como vigas y columnas aún se encuentran en prototipos de laboratorio.

* Trabajo de Grado

** Facultades de Fisicomecánicas y Fisicoquímicas. Escuela de Ing. Civil e Ing. Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director José Miguel Benjumea Royero. Codirector Mauricio Rincón Ortiz

Abstract

Title: Use of vegetable fibers as structural reinforcement in cement matrix composite materials:
State of the art

Author: Angie Dayanna Marin Medina, Valeria Laverde Sarmiento

Key Words: Vegetable Fibers, Cementitious Matrix Composite, Reinforcement, Surface Treatments, Structural Elements, Mechanical Properties.

Description:

Over time, the research for sustainability as the use of building materials has incited interest in the use of vegetal fibers as reinforcement for cementitious matrix composites. These fibers are renewable, they are also low cost and they offer benefits such as lightness, stiffness, biodegradability, and high impact resistance. This project aims to present a research review conducted over the last 20 years focused on the use of vegetable fibers as cementitious matrices reinforcement. For that purpose, the most used fibers were selected, the methods to improve composites properties and fiber's durability, the reinforced composites' mechanical behavior, and their applications in structural elements. It is highlighted that despite the benefits provided by these fibers in the reinforced composites mechanical properties, there is still little information related to the fiber's durability in cementitious matrixes, so the use of this kind of reinforcement in primary structural elements such as beams and columns are in laboratory prototypes yet.

* Bachelor Thesis

** Facultades de Fisicomecánicas y Fisicoquímicas. Escuela de Ing. Civil e Ing. Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director José Miguel Benjumea Royero. Codirector Mauricio Rincón Ortiz

Introducción

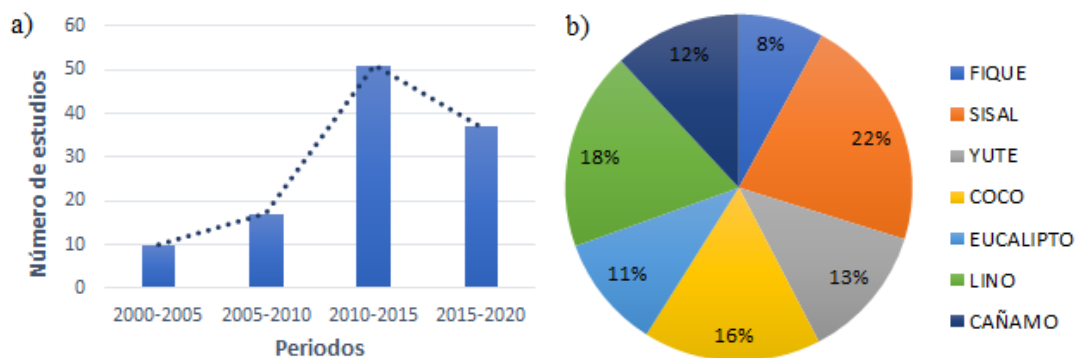
Los elementos estructurales de concreto son componentes importantes en el ámbito de la construcción, ya que su falla puede causar el colapso parcial o total de un sistema estructural. Con el paso de los años, estos elementos se deterioran debido al envejecimiento, sobrecargas, defectos de diseño, entre otros factores, razón que ha llevado al planteamiento y estudio de diferentes métodos para su reforzamiento. Una de las alternativas que se ha venido practicando para el reforzamiento de estos componentes es la introducción de fibras en la matriz cementosa. Convencionalmente, las fibras más utilizadas son las sintéticas que actúan aumentando la resistencia y ductilidad del compuesto. No obstante, la actual demanda de materiales ecológicos en la construcción ha impulsado la exploración de fibras vegetales como sustitutas de las fibras sintéticas, aportando a la disminución de costos en el procesamiento de estos compuestos y obteniendo materiales con alta rigidez específica, resistencia al impacto, ligereza, reciclabilidad y biodegradabilidad. A razón de ello, este proyecto tiene la finalidad de presentar el estado actual de las investigaciones y tendencias sobre el uso de fibras vegetales como reforzamiento estructural en materiales compuestos de matriz cementosa, con el propósito de dar a conocer la viabilidad del uso de estas fibras en la industria civil.

Para la elaboración del proyecto, se comenzó con una revisión exhaustiva de investigaciones realizadas durante los últimos años (Enero 2000 - Septiembre 2020) en el área de los compuestos cementosos reforzados con fibras vegetales, haciendo uso de bases de datos electrónicas (Science Direct, Scopus, Springer, EBSCO, SAGE Journals, ASCE Journals, ResearchGate, Google Scholar), libros, revistas y tesis doctorales. A partir de la revisión se realizó un primer análisis de las investigaciones experimentales encontradas, donde estudiaban el efecto de estas fibras en distintos compuestos cementosos (sin tener en cuenta los estudios tipo

review), infiriendo que, se realizó una mayor cantidad de avances en el periodo de 2010-2015 (Figura 1a). Posteriormente, se identificaron las fibras vegetales más empleadas en matrices cementosas (Figura 1b) destacándose en los estudios las fibras de sisal y lino. De igual forma, se seleccionaron las investigaciones relacionadas con la aplicación de tratamientos en las matrices cementosas y fibras vegetales, evaluando su efecto sobre el rendimiento mecánico de los compuestos. También se discutió la modificación de las propiedades mecánicas de flexión, tensión, compresión y tenacidad de matrices cementosas al ser reforzadas con distintas fibras vegetales (cortas o tejido continuo). Finalmente, se cerró con una visión general de las aplicaciones y avances en elementos estructurales que han tenido estos compuestos cementosos.

Figura 1

Revisión de estudios relacionados con el refuerzo de fibras vegetales en matrices cementosas: a) Porcentaje de contribución cronológico del 2000-2020 de estudios encontrados durante la revisión bibliográfica. b) Porcentaje de estudios relacionados con cada fibra vegetal.



1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar a partir de revisión literaria, las propiedades de fibras vegetales y su uso como reforzamiento estructural en materiales compuestos de matriz cementosa.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las fibras vegetales más empleadas como reforzamiento estructural en materiales compuestos de matriz cementosa.

Clasificar los tipos de tratamientos superficiales más utilizados en fibras vegetales para modificar su resistencia mecánica, durabilidad e interfaz con matrices cementosas.

Comparar el efecto del tipo de reforzamiento de fibras vegetales en forma de fibras cortas o tejido continuo en las propiedades mecánicas de compuestos de matriz cementosa.

Identificar las aplicaciones en la industria de la construcción de fibras vegetales como reforzamiento estructural en materiales compuestos de matriz cementosa, en función del tipo de fibra.

2. Fibras Vegetales

Se conoce como fibra natural a los fragmentos, hebras o pelo, cuyo origen está en la naturaleza y se clasifican generalmente en tres ramas: las de origen animal, las derivadas de minerales y las de origen vegetal. Las fibras animales abarcan las proteínas específicas, incluyendo seda, lana y fibra capilar. Por otra parte, las fibras derivadas de minerales incluyen el asbesto, wollastonita y palygorskita, mientras que las de origen vegetal comprenden el yute, lino, algodón, sisal, cáñamo, entre otras (Onuaguluchi & Banthia, 2016). Este último grupo de fibras se puede encontrar en una amplia variedad de morfologías según la parte de la planta de donde son extraídas, siendo clasificadas en fibras de: estera (p.ej., cáñamo, yute, kenaf y lino), hojas (sisal, piña y plátano), tallos (cañas, bambú y hierba) y semillas (algodón, fibra de coco y otras) (Jawaid & Abdul Khalil, 2011)(Rodríguez, 2020). Adicionalmente, como lo exponen Ardanuy et al. (Ardanuy et al., 2015), las fibras también son categorizadas según su longitud en: hebras (fibras largas con longitudes entre 20 y 100 cm), fibras cortas (longitud corta que permite hilar las fibras) o pulpas (fibras muy cortas de longitudes entre 1–10 mm).

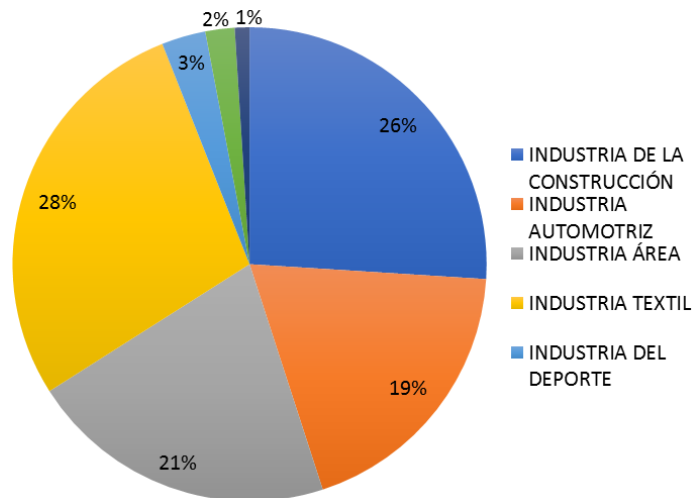
El concepto de refuerzo en matrices de cemento con fibras fue desarrollado en la década de 1970, cuando se evaluó la sustitución de las fibras de asbesto por fibras vegetales (Tonoli et al., 2011). El progreso de este tipo de estudios se ha fomentado debido al creciente interés en los aportes de propiedades mecánicas y bajo costo que ofrecen estas fibras. Adicionalmente, la creciente demanda de materiales ecológicos en la construcción ha llevado a postular estas fibras vegetales como sustitutas de las fibras sintéticas en la elaboración de paneles estructurales, vigas unitarias, marcos de puertas, entre otros (Ray & Sarkar, 2001). Puesto que el uso de fibras vegetales implica menores costos y consumo de energía en el procesamiento de compuestos cementosos

reforzados con fibra, presentando una alta rigidez específica, resistencia al impacto, ligereza estructural, reciclabilidad y biodegradabilidad (Hidalgo-Salazar & Correa, 2018).

El creciente interés en el uso de fibras vegetales como refuerzo de elementos estructurales es también expuesto por Shireesha et al. (Shireesha & Nandipati, 2019), quienes muestran que el sector de la construcción abarca el 26% de todas las aplicaciones de estas fibras (Figura 2), estando sólo un 2% por debajo del uso en la industria textil. Los beneficios que resultan del uso de las fibras vegetales como refuerzo en la construcción ha sido influenciado principalmente por la ventaja en el comportamiento del compuesto después de que el agrietamiento ha comenzado, puesto que las fibras reducen la propagación de las grietas y mejoran la transferencia de tensiones (Abiola, 2014)(Morton et al., 2010).

Figura 2

Aplicación de fibras naturales



Nota. Aplicación de fibras naturales, tomada de Adaptado de “Application on natural fibers” (p.17), por Shireesha, Y.Nandipati, 2019, Materials Today: Proceedings.

A continuación, se describen las fibras vegetales de sisal, lino, cáñamo, eucalipto, coco y yute, caracterizadas por ser unas de las fibras vegetales más estudiadas y utilizadas como refuerzo

en matrices cementosas. Adicionalmente, se ha incluido en esta investigación la fibra de fique puesto que se ha venido tomando interés en su uso como refuerzo al ser una de las fibras vegetales más producidas en Colombia, sin embargo, es importante aclarar que la información disponible y el número de estudios realizados hasta la fecha acerca de esta fibra son bajos en comparación con las otras.

2.1 Sisal

La fibra de sisal es una de las más utilizadas y cultivadas principalmente en Brasil y África Oriental (Chand et al., 1988). Se distingue por ser una fibra dura y duradera que posee una baja carga de mantenimiento, absorbe poca humedad y presenta excelentes propiedades acústicas y de absorción de impactos (Dash et al., 2013). Estas características proporcionan mejoras en los materiales de matriz cementosa reforzados con esta fibra, lo que la ha llevado a ser una de las fibras más estudiadas en este tipo de aplicaciones gracias al aumento de la capacidad de absorción de energía de los compuestos (Ardanuy et al., 2015).

2.2 Lino

El lino es una fibra vegetal proveniente de la planta *Linum usitatissimum* cultivada especialmente en Canadá con una gran producción mundial (Lino et al., 1941). Esta fibra ha sido muy utilizada como refuerzo en morteros y hormigones, ya sea dentro de la matriz como fibras cortas o como un recubrimiento externo en forma de tejidos, dado que presenta una alta resistencia a la tensión que ayuda a restringir la propagación de las grietas dentro de la matriz (Page et al., 2019).

2.3 Cáñamo

También llamada “*Cannabis sativa*”, es una planta anual que crece en climas templados perteneciente a la familia del cannabis, con una gran producción en la Unión Europea (Faruk et al., 2012). Sus principales aplicaciones se dan en la producción de cuerdas, paños y compuestos

no estructurales de automóviles (Shireesha & Nandipati, 2019). Esta fibra se caracteriza por presentar una alta resistencia a la tracción y fuerte tolerancia a ambientes alcalinos, convirtiéndose en una buena alternativa como refuerzo de materiales compuestos incrementando sus propiedades de tenacidad (Z. Li et al., 2006).

2.4 Eucalipto

Esta fibra pertenece al género *Eucalyptus* y se encuentran gran variedad de sus derivados en todo el mundo al igual que la mayoría de las fibras, sus propiedades químicas y físicas varían dependiendo de la especie, el sitio de plantación, la edad del árbol y los especímenes individuales (E & A.G, 1984). Los diferentes prototipos de esta fibra presentan propiedades mecánicas favorables y se encuentran disponibles a un bajo costo, siendo utilizada en gran medida como refuerzo de matrices cementosas por su favorable interacción fibra-matriz (Carvalho et al., 2020)(Khorami & Ganjian, 2011).

2.5 Coco

Las fibras de coco se encuentran entre la cáscara interna y externa del coco, caracterizadas por ser una de las fibras vegetales más baratas del mercado. Se estima que aproximadamente el 10% de todas las cáscaras se utilizan para la extracción de la fibra, lo que ha favorecido al aumento de su demanda (Faruk et al., 2012). La capacidad de refuerzo y resistencia de estas fibras mejora sustancialmente al ser tratadas químicamente, incrementando la resistencia a la flexión y tenacidad de los compuestos reforzados con estas fibras (Shireesha & Nandipati, 2019).

2.6 Yute

El yute es la segunda fibra vegetal más cultivada en el mundo, producida en climas monzónicos como en las regiones de Bangladesh, India y China a partir de plantas anuales del género *Corchorus* (Summerscales et al., 2010)(Faruk et al., 2012). En diferentes estudios se ha evaluado el aporte significativo de estas fibras en las propiedades mecánicas de materiales

compuestos, evidenciando mejoras sustanciales en la resistencia a la flexión y tracción de los materiales (Islam & Ahmed, 2018).

2.7 Fique

El fique es una de las fibras vegetales más abundantes y utilizadas en la región andina de América del Sur, provenientes de las plantas del género *fucrea* (Vidal, 2011)(Hidalgo-Salazar et al., 2015). Se caracterizan por su baja densidad, alta resistencia al desgaste, flexibilidad y excelente degradación térmica (Castellanos et al., 2012). Razones que la ha llevado a ser implementada en compuestos de matriz cementosa para aplicaciones de vivienda de bajo costo, siendo adecuada para fabricar elementos de diversas formas con procesos de producción simples (Tonoli et al., 2011).

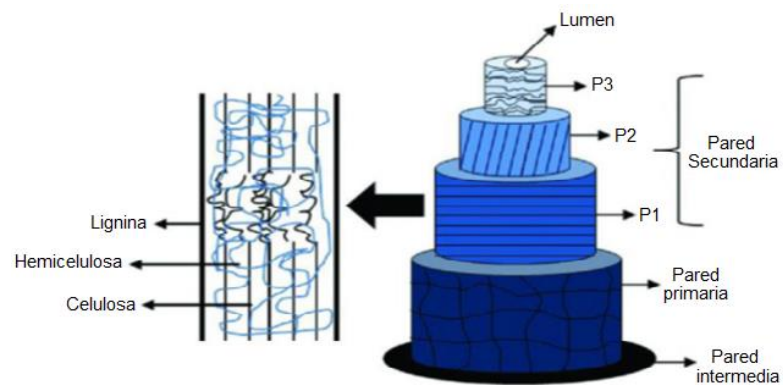
2.8 Composición Química y Propiedades Mecánicas de las Fibras Vegetales

El refuerzo de materiales compuestos con fibras vegetales es influenciado por las propiedades químicas y mecánicas de las fibras que a su vez dependen de las fuentes, procesos de extracción, métodos de cultivo, cosecha y la edad de la fibra (A. Ali et al., 2018). La estructura celular de estas fibras está compuesta por microfibrillas de celulosa que refuerzan la matriz de lignina, pectina y hemicelulosa (Figura 3). Las microfibrillas están enrolladas helicoidalmente a lo largo del eje de la fibra hueca ofreciendo resistencia, dado a que se requiere alta energía para desenrollar las fibrillas orientadas. La orientación paralela de las fibrillas al eje de la fibra aumentan su rigidez y resistencia a la tracción (John & Thomas, 2008). Por otro lado, la presencia de la hemicelulosa favorece a la biodegradación, absorción de humedad y degradación térmica junto con la lignina que es la responsable de la degradación UV (Ultravioleta), caracterizándose por ser quién aporta rigidez a la fibra (Faruk et al., 2012). La composición porcentual de cada uno de estos componentes varía para las diferentes fibras e influye directamente en las propiedades mecánicas de la fibra, por lo tanto, la selección adecuada de la fibra y el pretratamiento de las

mismas es un factor importante para su uso como material de refuerzo. En la tabla 1 se presentan los rangos típicos de composición química de estas fibras. Las fibras con mejores características de durabilidad son las de coco y sisal, las cuales tienen menores porcentajes de hemicelulosa que fomenta la degradación de la fibra y a su vez contienen altas cantidades de lignina que aportan a la rigidez. Por el contrario, las fibras de eucalipto tienen mayor grado de biodegradación y absorción de humedad por sus altos contenidos de hemicelulosa.

Figura 3

Estructura de las fibras naturales..



Nota. Adaptado de “Composition of natural fibers” (p.3429), por M. S. S. Godara, 2019, Materials Today: Proceedings.

Tabla 1

Porcentajes de composición de las fibras.

Fibra	Celulosa (% en peso)	Hemicelulosa (% en peso)	Lignina (% en peso)	Ceras (% en peso)	Referencias
Cáñamo	68-74	15-22.4	3.7-10	0.8	(Dash et al., 2013; Dittenber & Gangarao, 2012)
Coco	32-60	0.15-0.28	20-48	4.0	(A. Ali et al., 2018; Dittenber & Gangarao, 2012; Faruk et al., 2012)
Fique	53-73.8	17-26	10.1-21	5.0	(Benin & Bright, 2020; Castellanos et al., 2012; Herrera, 2020)

Yute	33.4-71	14-22.7	12-28	0.5	(Faruk et al., 2012; Onuaguluchi & Banthia, 2016)
Lino	70-73	18.6-20.6	2-2.2	1.5-1.7	(Agopyan et al., 2005; A. Ali et al., 2018; Faruk et al., 2012)
Sisal	38.2-88	10-26	3.75-26	1.0-2.0	(Arsène et al., 2003; Dash et al., 2013; Y. Li et al., 2000; Onuaguluchi & Banthia, 2016)
Eucalipto	41.57-89	24.9-32.56	0.5-25.4	-	(Arsène et al., 2003; Onuaguluchi & Banthia, 2016)

Las propiedades mecánicas de las fibras dependen en gran medida de su composición química, la cual afecta directamente el rendimiento mecánico del compuesto. La degradación dual de lignina y hemicelulosa en la fibra aumenta el grado de separación interfibrilar, cooperando a la orientación de las microfibrillas en la dirección de la deformación, lo cual mejora el comportamiento de tenacidad del compuesto al absorber mayor cantidad de energía (Herrera, 2020). De la misma forma, la capa intermedia de la pared secundaria de la planta es otro factor influyente en las propiedades mecánicas de la fibra, dado que la celulosa presente en esta capa tiene una relación directamente proporcional con el módulo de Young y la resistencia a la tracción de la fibra (John & Thomas, 2008). Además de la hemicelulosa producida por las partes no cristalinas contenidas en las porosidades de la fibra que le confiere las propiedades de absorción de humedad y fragilización (Faruk et al., 2012). Los valores de las propiedades mecánicas de las fibras con las que se suelen encontrar en diferentes trabajos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2

Rango de propiedades mecánicas y humedad de cada fibra.

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación última (%)	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Referencias
Cáñamo	95-1735	2.8-90	1.5-51.4	1.48	9	(A. Ali et al., 2018; Dittenber & Gangarao, 2012; Faruk et al.,

Coco	100-250	3.3-6	30	1.2	10-11.3	2012; Onuaguluchi & Banthia, 2016) (A. Ali et al., 2018; Dittenber & Gangarao, 2012; Faruk et al., 2012; Ho et al., 2012; Onuaguluchi & Banthia, 2016)
Fique	43-571	5.7-24.06	9.8	0.72	7.71-12	(Benin & Bright, 2020; Castellanos et al., 2012; Delvasto et al., 2010; Hidalgo & Muñoz, 2010)
Yute	200-773	20-55	1.5-1.8	1.3	12	(A. Ali et al., 2018; Faruk et al., 2012; Ho et al., 2012)
Lino	345-1496	27.6-58.6	2.7-3.2	1.5	7.7	(A. Ali et al., 2018; Duval et al., 2011; Faruk et al., 2012; Ho et al., 2012; Onuaguluchi & Banthia, 2016)
Sisal	80-855	9-38	1.9-14	1.5	11	(Benin & Bright, 2020; Dash et al., 2013; Inagaki et al., 2012; Onuaguluchi & Banthia, 2016)
Eucalipto	1000	40	-	0.66-0.94	45-81	(Arsène et al., 2003; Onuaguluchi & Banthia, 2016)

En la tabla 2 se observa que las fibras de cáñamo y lino son las que presentan mejores propiedades mecánicas, es por ello que han sido altamente utilizadas como material de refuerzo. Por ejemplo, Zhijian Li. et al. (Z. Li et al., 2004) demostraron que la tenacidad del hormigón reforzado con fibra de cáñamo fue 144% mayor que el del hormigón simple. Boghossian y Wegner (Boghossian & Wegner, 2008) realizaron un estudio en el cual se midieron las propiedades de un mortero reforzado con fibras de lino, concluyendo que este tipo de fibras ayudaron a reducir la propagación de las grietas dentro de la matriz. En cuanto a las demás fibras, los estudios analizados demuestran que también son una buena opción como refuerzo. Delvasto et al. (Delvasto et al., 2010) evaluaron un compuesto cementoso reforzado con un 3,3% de fique, encontrando que la carga de flexión al fallar fue 2875 N/m², siendo 475 N/m² más alto que el establecido por la Norma Colombiana de láminas onduladas para techos. Toledo Filho et al. (F. de A. Silva et al., 2009) evaluaron las propiedades mecánicas de morteros reforzados con fibras de sisal concluyendo que las fibras podían reducir el agrietamiento en el material dentro de la región de tracción, incrementando la capacidad de absorción de energía del compuesto (Ardanuy et al., 2015)(F. de

A. Silva et al., 2009). Del mismo modo, se encuentran investigaciones donde utilizan refuerzos con fibras de eucalipto como la de Júnior Carvalho et al. (Carvalho et al., 2020) que fabricaron un compuesto reforzado con estas fibras, donde observaron un aumento significativo en la tenacidad y módulo de rotura del material compuesto.

3. Tratamientos Superficiales

La implementación de fibras vegetales como refuerzo en compuestos de matriz cementosa está limitada por la durabilidad a largo plazo de estos materiales, relacionada principalmente con las estructuras y propiedades de las fibras (Rodríguez, 2020). Los compuestos cementosos se caracterizan por tener una matriz porosa de alta alcalinidad, siendo una de las principales causas de la falta de durabilidad de las pastas de cemento al favorecer la formación de grietas, disminuyendo su resistencia y tenacidad (Ardanuy et al., 2015). Este ambiente altamente alcalino mineraliza y degrada las fibras vegetales inmersas en la pasta cementicia al disolver las fases de lignina y hemicelulosa debilitando la estructura de la fibra (Pacheco & Jalali, 2011).

Actualmente existen dos alternativas de tratamientos superficiales para mejorar la durabilidad de los compuestos reforzados con fibra vegetal, los tratamientos que se aplican sobre las fibras y los que modifican directamente la matriz. Los primeros se enfocan en la modificación química de las fibras, con el objetivo de hacerlas menos sensibles a la composición de la matriz, disminuir su naturaleza hidrofílica y mejorar la transferencia de tensiones dentro del compuesto al maximizar la resistencia interfacial fibra-matriz exponiendo más grupos reactivos sobre la superficie (Faruk et al., 2012)(Karthi et al., 2020). Entre los tratamientos químicos más utilizados se encuentran la alcalinización, hornificación y tratamientos con silanos. Los otros métodos consisten en modificar la matriz cementosa reduciendo su alcalinidad, causada por el alto

contenido de hidróxidos de calcio en su composición que afectan la durabilidad de las fibras (Ardanuy et al., 2015). Para evitar este comportamiento generalmente son utilizados los tratamientos de carbonatación acelerada y adición de compuestos puzolánicos como el humo de sílice en la pasta cementosa (Ballesteros et al., 2019). La selección de cada de uno de estos tratamientos se da en función de diferentes aspectos ambientales y económicos, como se describe a continuación.

3.1 Alcalinización

El tratamiento alcalino o la mercerización es una de las alternativas más utilizadas de bajo costo en comparación con otros tratamientos como la acetilación y silanización (Gómez Hoyos & Vázquez, 2012). Este tratamiento se realiza sumergiendo las fibras vegetales en hidróxido de sodio (NaOH) acuoso, el cual altera las estructuras de red de enlace de hidrógeno debido a la reacción con la solución de base alcalina, dando como resultado la ionización de los grupos hidroxilo en alcóxidos y facilitando la exposición de grupos reactivos OH^- en la superficie de la fibra disminuyendo su carácter hidrofílico (Faruk et al., 2012). Simultáneamente, el tratamiento degrada de forma selectiva una cierta cantidad de lignina, pectina, hemicelulosa y materiales cerosos que aumentan la región interfibrilar, lo que produce una textura rugosa en la superficie de la fibra (Borsoi et al., 2019). Esta rugosidad provee la creación de sitios de anclaje mecánico, aumentando la unión fibra-matriz por la mejor adhesión con la exposición de la superficie de la fibra y en consecuencia mejora la respuesta mecánica del compuesto por la mayor transferencia de tensiones y homogeneidad en la matriz (Godara, 2019).

Entre los métodos de aplicación más utilizados, se usan concentraciones constantes de NaOH entre el 2-5% en peso, con las que se ha logrado obtener una mejor respuesta mecánica de las fibras (Liu et al., 2018; Van de Weyenberg et al., 2003; Yan et al., 2012). Siddika et al. (Siddika et al., 2014) modificaron químicamente fibras de yute y coco utilizando concentraciones de NaOH

de 5% y 10%, indicando en sus resultados que el compuesto modificado con 5% NaOH presentaba mejores propiedades mecánicas en comparación con el compuesto de fibras tratadas con 10% NaOH. Este tratamiento suele mejorar en gran medida la resistencia última de los compuestos, por ejemplo Sedan et al. (Sedan et al., 2008) observaron que la aplicación de este tratamiento sobre las fibras de cáñamo a pesar de que afectó la rigidez del compuesto disminuyendo su módulo de Young, degradó la hemicelulosa contenida en la fibra generando mayor rugosidad y transferencia de esfuerzos dentro de la matriz, lo cual resultó en una mejora del 93.9% en el módulo de rotura (MOR) del compuesto (tabla 3).

3.2 Silanización

El silano (SiH_4) es una molécula multifuncional utilizada como agente de acoplamiento para modificar y estabilizar la fibra vegetal, cumpliendo la función de un revestimiento en la superficie porosa de las fibras penetrando y recubriendo los poros. Estos agentes de acoplamiento de silano reaccionan con los grupos hidroxilos de celulosa, eliminándolos de la interfaz fibra-matriz y formando en su lugar una estructura de reticulación de enlaces covalentes en la membrana celular de la fibra (Xue & Tabil, 2007). Las cadenas de hidrocarburos de la estructura restringen el hinchamiento de la fibra, mejorando la adhesión del material compuesto y estabilizando sus propiedades mecánicas (Wang et al., 2020)(Kabir et al., 2012).

Este tipo de agentes de acoplamiento de silano también han sido utilizados directamente en las pastas de cemento como aditivos por su efecto retardante a una edad muy temprana de la pasta, lo cual mejora la hidratación del cemento, disminuye la porosidad y aumenta la resistencia a la compresión y flexión del material (B. Chen et al., 2020). A causa de su buena interacción con este tipo de matrices cementosas, se consideran una opción conveniente como tratamiento superficial de las fibras embebidas en estos compuestos. Tonoli et al. (Tonoli et al., 2009) reforzaron un cemento con fibras de eucalipto modificadas con aminopropiltriétoxilano (APTS)

y metacriloxipropiltrimetoxisilano (MPTS), evidenciando que las fibras modificadas con MPTS presentaron menor hidratación por la pasta de cemento, mientras que las fibras modificadas con APTS exhibían mayores productos de hidratación, lo cual optimiza la interacción con la matriz y la distribución de esfuerzos incrementando el MOR del compuesto (Tabla 3).

3.3 Hornificación

Es uno de los tratamientos superficiales más usado en las fibras vegetales al ser económico y fácil de implementar, debido a que se define básicamente como un proceso de ciclos de rehumedecimiento y secado (Josep Claramunt et al., 2011). Dicho tratamiento se caracteriza por mejorar la estabilidad dimensional y durabilidad de la fibra al disminuir su naturaleza hidrofílica (Ardanuy et al., 2015)(J. Claramunt et al., 2010). Este tratamiento promueve fuertes enlaces interfaciales cruzados entre las fibrillas de la estructura por medio de enlaces de hidrógeno, lo cual aumenta la contracción de la estructura de la fibra, cierra las brechas interfibrilares, reduce la elasticidad de la pared celular y modifica el tamaño de los poros, logrando que se restrinjan todas las limitaciones relacionadas con la capacidad de hinchamiento de las fibras en condiciones de humedad (Ballesteros et al., 2019; Han et al., 2012; Hribernik et al., 2016; Luo et al., 2011). Mejía et al(Ballesteros et al., 2015, 2017) evaluaron este tratamiento en un compuesto reforzado con fibras de eucalipto y pino, destacando que la hornificación modificó la morfología de las fibras al reducir el lumen de la fibra, lo cual genera una superficie más rugosa aumentando la adhesión interfacial fibra-matriz.

3.4 Carbonatación acelerada

La carbonatación acelerada es un tratamiento aplicado directamente a la matriz, realizado en cámaras atmosféricas de humedad enriquecidas con dióxido de carbono (CO₂). El proceso se inicia con la difusión de CO₂ en la capa más externa del compuesto y se desplaza sucesivamente a las capas internas por medio de fisuras buscando la estructura de poros permeables. Una vez en el

sistema de poros, el compuesto se disuelve en una fase acuosa y se genera una reacción rápida de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con dióxido de carbono (CO_2), resultando en carbonato de calcio (CaCO_3). Este proceso de hidratación de la pasta de cemento mejora el rendimiento mecánico del compuesto al reducir la alcalinidad, porosidad y la permeabilidad de la matriz, mejorando la interacción de las fibras dentro del compuesto (Ardanuy et al., 2015; Ballesteros et al., 2019; Tonoli et al., 2010).

La aplicación de este tratamiento sobre matrices cementosas se suele encontrar en conjunto con el tratamiento de hornificación aplicado a las fibras vegetales (tabla 4). Ballesteros et al. (Ballesteros et al., 2019) evaluaron el efecto de utilizar estos dos tratamientos sobre un compuesto cementoso reforzado con fibras de eucalipto, observando que la hornificación contribuyó a una mayor absorción de energía, a la vez que la carbonatación acelerada mejoró el módulo de rotura proporcionando una matriz más densa. El efecto sinérgico de estos tratamientos promovió a la obtención de un compuesto con mejor estabilidad dimensional y transferencia de esfuerzos en la interfaz fibra-matriz.

3.5 Adiciones Puzolánicas: Humo de Sílice

El humo de sílice es sílice no cristalina muy fina producida en hornos de arco eléctrico como un subproducto del silicio elemental, este subproducto mantiene una reactividad puzolánica y tiene un efecto de relleno al introducirlo en matrices cementosas. Este tratamiento aplicado a las matrices, se caracteriza por reducir la porosidad del compuesto y disminuir la alcalinidad de la matriz (Zhao et al., 2018). En las últimas décadas ha aumentado el uso de sílice en las mezclas de hormigón como reemplazo del cemento mejorando la resistencia a la compresión, a la rotura y el módulo de elasticidad de los compuestos (Barham et al., 2021).

Al igual que la carbonatación acelerada, las adiciones puzolánicas de humo sílice también se pueden utilizar simultáneamente con tratamientos como la hornificación (tabla 4). Toledo et al. (Tolêdo Romildo D. et al., 2003) utilizaron los tratamientos de carbonatación y humo de sílice al

momento de reforzar compuestos cementosos con fibras de coco y sisal, logrando una mejora en la resistencia a la flexión y en mayor medida en la resistencia a la rotura del compuesto (MOR), debido a la reducción de la alcalinidad en la matriz proveída por los tratamientos que mejoraron la durabilidad de la fibra.

En la tabla 3 se expone el efecto de los tratamientos superficiales aplicados a las fibras sobre las propiedades mecánicas de los compuestos cementosos en diversos estudios. En ella, se logra evidenciar una tendencia a aumentar la resistencia a la rotura (MOR) de los compuestos con los tres tipos de tratamientos. Este comportamiento como se explicaba anteriormente, se relaciona con el efecto que generan en la resistencia interfacial al producir sitios de anclaje mecánico en la superficie de la fibra mejorando la unión fibra-matriz y transferencia de tensiones dentro del compuesto (Godara, 2019). Así mismo, el comportamiento en flexión de los compuestos se ve beneficiado por la aplicación de estos tratamientos, sin embargo, para la alcalinización se observa un efecto negativo sobre el módulo de elasticidad. Según Sedan et al. (Sedan et al., 2008) el tratamiento alcalino a pesar de mejorar la superficie de la fibra tiende a fragilizarla, afectando la rigidez y módulo de elasticidad del compuesto. Por el contrario, los tratamientos de silanización y hornificación presentan un mejor efecto sobre la rigidez del compuesto, puesto que actúan disminuyendo la porosidad de la matriz mejorando su módulo de elasticidad (MOE).

De los resultados expuestos en tabla 3 es importante aclarar que la diferencia de porcentajes entre estudios es causada no solo por los métodos de aplicación y fibras utilizadas en cada tratamiento, sino también por otros factores como las características de la fibra, composición de la matriz, métodos de prueba, entre otros. Razones que dificultan comparar el efecto en las propiedades mecánicas de los compuestos entre tratamientos. Este tipo de casos se evidencia en los estudios encontrados de hornificación, donde por una parte están los trabajos realizados por

Ferreira et al. entre 2012 y 2017 (Ferreira et al., 2012, 2017), que presentan resultados similares de un incremento del 120% en módulo de elasticidad (MOE), debido a que en ambos estudios utilizaron fibras de cáñamo y matrices cementosas de alto rendimiento (hormigón con cenizas volantes, meta caolín y ligantes). Mientras que en el trabajo de Ballesteros et al. (Ballesteros et al., 2015) se evidencia solo una disminución del 8% en el MOE, lo cual se asume que está relacionado principalmente con el tipo de matriz que utilizaron, siendo una convencional sin aditivos con menor rendimiento mecánico.

Tabla 3

Efecto de tratamientos superficiales de las fibras en las propiedades mecánicas de los compuestos.

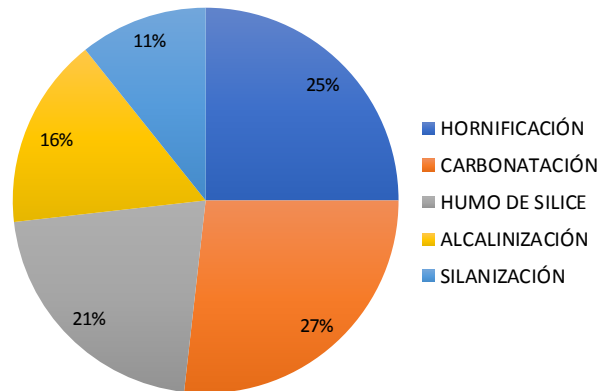
	Especificación del tratamiento	Fibra	Efecto propiedades mecánicas $\pm\%$			Referencia
			R. Flexión	MOE	MOR	
<u>Alcalino (%NaOH)</u>	6%	Cáñamo		-23.84%	+93.9% +24.68%	(Marianne Le Troëdec et al., 2009; Sedan et al., 2008)
	5%	Yute		-11.76%	+5.06%	(Fonseca et al., 2019)
	5%	Lino			+48.78%	(Boulos et al., 2018)
	3%	Fique			+34.41%	(Herrera, 2020)
	0.5%	Yute		-66.6%	+33.3%	(Chakraborty et al., 2013)
	1.6 M	Cáñamo		+37.5%	+71.43%	(M. Le Troëdec et al., 2011)
	1.7 M	Cáñamo	+15.08% +14.87%		+13.47% +13.48%	(A. Hakamy et al., 2015; Ahmad Hakamy et al., 2018)
<u>Silano</u>	APTS, MPTS	Eucalipto		+41.35% +35.34%	+22.22% +8.08%	(Tonoli et al., 2009)
	APTS, MPTS	Eucalipto		+16.35% +5.03%	+3.15% +11.81%	(Tonoli et al., 2013)
	Alquilalcoxisilano	Kraft		+61.36%	+27.2%	(Pehanich et al., 2004)
	Alquilalcoxisilano	Kraft	+10.62%			(Blankenhorn et al., 2001)
	Vinil-Silano	Curauá	+48.76%		+85.38%	(Soltan et al., 2017)
<u>Hornificación H</u>	4 ciclos	Eucalipto		-8%	+20%	(Ballesteros et al., 2015)
	10 ciclos	Sisal	+15%	+120%	+11%	(Ferreira et al., 2012, 2017; Soltan et al., 2017)

10 ciclos	Sisal	+65%		+11%	(R. D. J. Santos & Lima, 2015)
4 ciclos	Kraft y algodón	+8.97%	+12.07%	+26.55%	(Josep Claramunt et al., 2011)
		+20%	+29.51%	+3.85%	

Nota. Los estudios con más de una referencia son debido a una agrupación realizada cuando los resultados tenían una diferencia de solo $\pm 3\%$ y utilizaban la misma fibra y tratamiento.

Figura 4

Revisión sobre el uso de tratamientos superficiales en compuestos de matriz cementosa.



La recopilación de estudios llevada a cabo durante la revisión bibliográfica permitió realizar un análisis cualitativo de los tratamientos superficiales más utilizados en compuestos cementosos reforzados con fibras vegetales (figura 4). Destacándose las modificaciones realizadas directamente a la matriz con adiciones puzolánicas y/o carbonatación acelerada que suelen utilizarse de manera simultánea con el tratamiento de hornificación aplicado a las fibras (Ballesteros et al., 2019; Tolêdo Romildo D. et al., 2003; Tonoli et al., 2010). Según la tabla 4 el módulo de rotura y la resistencia a la tensión aumentan con la aplicación de la carbonatación acelerada y humo de sílice sobre la matriz. Esta mejora en las propiedades mecánicas como se explicaba en las secciones 2.4 y 2.5 es causada por la disminución de alcalinidad de la pasta cementicia que contribuye a la adherencia fibra-matriz y durabilidad del refuerzo. No obstante, en el estudio de Carvalho et al. (Carvalho et al., 2020) donde utilizan un tratamiento de humo de sílice se presentó un aumento significativo de 198% en la resistencia a la tensión del compuesto,

exponiendo que este gran incremento fue dado por la aplicación adicional de un látex de caucho natural utilizado para recubrir y mejorar la adhesión de la fibra, lo cual benefició su interacción con la matriz en comparación con los demás estudios.

En cuanto al módulo de elasticidad (MOE) se presentan variaciones entre los resultados expuestos en la tabla 4, lo cual se asume que está relacionado con la diferencia de matrices y metodologías de ensayo utilizadas en los estudios, esto debido a que el módulo de elasticidad está directamente relacionado con la rigidez de la pasta cementicia. En contraste, Santos et al. (V. Santos et al., 2017) en su estudio expone que el aumento del 48% en el MOE de un compuesto cementoso reforzado con fibra de eucalipto, fue debido a una hidratación térmica de 48 horas realizada a las fibras que mejoró la interacción fibra-matriz y homogeneidad del compuesto.

Tabla 4

Efecto de los tratamientos en las matrices cementosas en las propiedades mecánicas de los compuestos.

	Especificación del tratamiento	Fibra	Efecto propiedades mecánicas $\pm\%$			Referencia
			R. Tensión	MOE	MOR	
<u>Humo de Sílice</u>	Impregnada	Coco		+75%		(E. J. da Silva et al., 2017)
	15%	Coco	+4%	-6.2%	+69%	(Khan & Ali, 2019)
	10%	Coco			+27%	(Toledo Filho et al., 2005)
	15%	Eucalipto	+198%		+42%	(Carvalho et al., 2020)
	10%	Sisal			+27%	(Toledo Filho et al., 2005)
<u>Carbonatación</u>	C.A	Eucalipto		-13%	+90%	(Almeida et al., 2013)
	C.A 24 h	Eucalipto	+100%	+48%	+72%	(V. Santos et al., 2017)
	C.A 24h	Sisal y Eucalipto		-10%	+24%	(S. F. Santos et al., 2015)
<u>C.A-H-H.S</u>	C.A - H 4 ciclos	Eucalipto		+7%	+45%	(Ballesteros et al., 2019)
	C.A-H 200 ciclos	Sisal	+74%		+32%	(Tonoli et al., 2010)
	H.S 10% - C.A 109 días	Sisal			+42%	(Tolêdo Romildo D. et al., 2003)

4. Propiedades Mecánicas de Compuestos Cementosos Reforzados con Fibras Vegetales

Los materiales a base de cemento describen un comportamiento frágil bajo cargas de flexión y tensión debilitando el rendimiento mecánico del compuesto al generar y propagar grietas dentro de la matriz (Halvaei et al., 2014). Este comportamiento implica baja tenacidad, generando el colapso del compuesto cuando se excede su resistencia máxima a la flexión. El reforzamiento de matrices cementosas con fibras vegetales palía esta problemática, puesto que las fibras aportan rigidez a la matriz y mejoran su respuesta posterior al agrietamiento, permitiendo un modo de falla progresivo del compuesto (Filho et al., 2013)(Shokrieh et al., 2015).

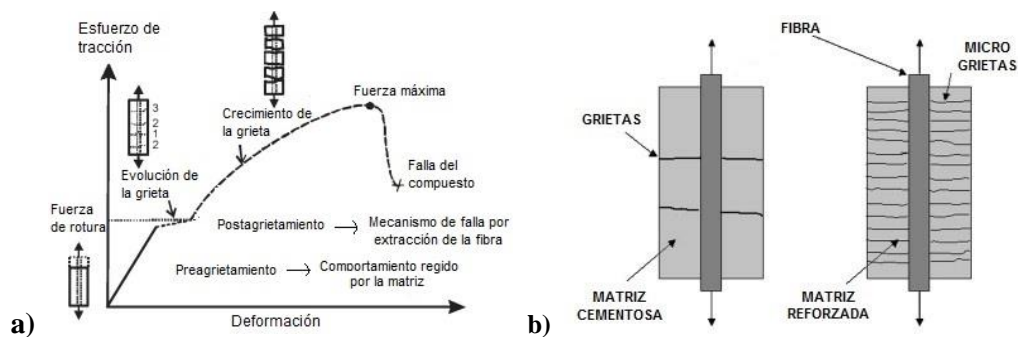
Los compuestos reforzados con fibras vegetales generalmente se clasifican en “Compuestos cementosos reforzados con fibra” (FRCC por sus siglas en ingles), que contienen fibras cortas o pulpas y “Compuestos cementosos reforzados con textiles” (TRCC por sus siglas en ingles), que contienen fibras largas alineadas o tejidos, también conocidos como estructuras textiles (Ardanuy et al., 2015)(Hannawi et al., 2016). La gran mayoría de estudios se han enfocado en el uso de fibras cortas o pulpa como material de refuerzo, debido a que son una materia prima barata y se pueden dispersar fácilmente en agua, el cual es un componente básico para la preparación de las matrices cementosas (Karade, 2010). Este tipo de compuestos es común encontrarlos con el nombre de “fibrocemento”, en los cuales se introducen las fibras directamente a la pasta para la fabricación de las probetas. Por otro lado, los estudios relacionados con fibras largas o tejidos continuos son mucho más escasos, debido a la poca información sobre técnicas de producción, mecanismo de falla y el efecto de la geometría y alineación del tejido en el compuesto.

En estudios se ha encontrado la respuesta típica de los elementos cementosos reforzados con fibras vegetales, donde al ser sometidos a flexión es principalmente la matriz la que soporta

las cargas en la parte lineal elástica, pero una vez el agrietamiento comienza entran en función las fibras vegetales absorbiendo mayores cantidades de energía, soportando las cargas y manteniendo unidas las partes de la matriz (Andrade et al., 2011). Este efecto se evidencia en la zona plástica de la curva esfuerzo - deformación (figura 5a) con el aumento en la ductilidad del compuesto. En la figura 5b se muestra la influencia de la inclusión de las fibras en el agrietamiento de la matriz, donde las grietas individuales se transforman en sistemas de microgrietas que pueden ser aceptables desde el punto de vista de seguridad y durabilidad (Brandt, 2008). Las fibras cortas tienden a estar mejor distribuidas dentro de la matriz cementosa y el aumento de su longitud disminuye la evolución del agrietamiento en el proceso de fraguado (contracción plástica), evitando la apertura y propagación de microgrietas, mientras que las fibras largas controlan las grietas más grandes reduciendo la distancia de la fisura durante la carga hasta que se alcanza una condición estable en el compuesto (Ardanuy et al., 2015).

Figura 5

Influencia de la inclusión de las fibras en el agrietamiento de la matriz cementosa: a) Dibujo esquemático de la respuesta a la tracción de un fibrocemento b) Patrón de fisuras en elementos sin reforzar y reforzado con fibra.



Nota. Figura a) Adaptado de “Schematic drawing of the tensile response of a continuous sisal fiber cement based composite” (p.4), por Andrade et al., 2011, Cement & Concrete Composites. Figura b) Adaptado de “Crack pattern in reinforced concrete (RC) and fibre reinforced concrete (FRC) elements subjected to tension” (p.4), por A. M. Brandt, 2008, Composite Structures.

Cualquier comparación de las propiedades mecánicas de los compuestos entre diferentes autores y trabajos es compleja, ya que las propiedades pueden variar significativamente por causa de factores como el tipo y características de la fibra, los tratamientos aplicados en la fibra o en la matriz, la composición de la matriz, el método de fabricación y de ensayos mecánicos. Aun así, se ha logrado evidenciar una correlación entre ciertas propiedades mecánicas del compuesto y la forma de la fibra. Esto queda patente en la figura 6, la cual muestra el efecto de la longitud de las fibras sobre el comportamiento mecánico a flexión, compresión, tensión y tenacidad de los compuestos.

En la figura 6a se muestra que la resistencia a la flexión aumenta al utilizar fibras vegetales cortas y largas como refuerzo en la matriz cementicia, mejora que está relacionada con el efecto en la unión y velocidad de propagación de las grietas que generan las fibras, lo cual conduce a una redistribución de esfuerzos dentro de la matriz antes de la fractura. En estudios donde evalúan el efecto de fibras cortas sobre la resistencia a la flexión de los compuestos (Gañán & Mondragon, 2004; Hwang et al., 2016; Khorami & Ganjian, 2011; Page et al., 2017; Ramakrishna & Sundararajan, 2005a; F. M. R. do. Santos et al., 2016; Sawsen et al., 2014), recalcan que además de la longitud, el contenido de fibras dentro de la matriz es otra variable importante, notando que entre mayor es la cantidad de fibras mejor es el efecto del refuerzo al aumentar la distribución de esfuerzos dentro de la matriz. Onuaguluchi et al. (Onuaguluchi & Banthia, 2016) evalúa el contenido de fibras de sisal, eucalipto, kraft y plátano en la resistencia a la flexión de una matriz cementosa, planteando que existe un cantidad óptima de fibras de 8-10% para mejorar el comportamiento mecánico de los compuestos. Por otra parte, la diferencia más pronunciada de resistencia a la flexión con fibras largas mostrada en la figura 6a es debido a que en comparación con las cortas, que solo proporcionan un efecto de refuerzo en la dirección longitudinal de la fibra,

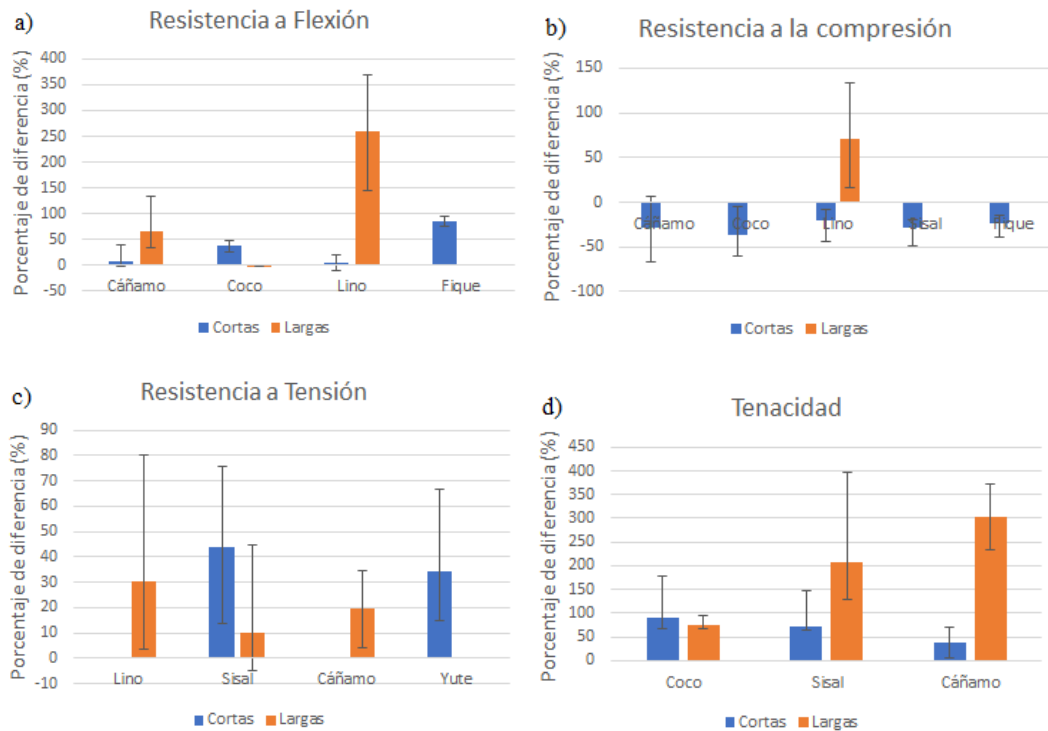
los tejidos pueden ofrecer refuerzos efectivos para la matriz en múltiples direcciones transfiriendo mejor las cargas (Asprone et al., 2011; A. Hakamy et al., 2013; Z. Li et al., 2006; Sedan et al., 2008; Yan, 2016). Unas de las fibras más encontradas como refuerzo en forma de tejidos estructurales fueron las de lino y cáñamo, catalogándose por tener un mejor comportamiento a flexión (Mercedes Cedeño, 2019). Yan Libo (Yan, 2016) realizó un refuerzo externo de vigas y cilindros de concreto simple con 2, 4 y 6 capas de tejido de lino, obteniendo un incremento notable de la resistencia, ductilidad y energía de fractura de los cilindros y de carga máxima y energía de fractura en las vigas, mejorando la resistencia a flexión en cada configuración de capas en aproximadamente un 146%, 260% y 369%, respectivamente.

El uso de fibras cortas reduce la resistencia a la compresión de los compuestos cementosos. Esto se muestra en la figura 6b, la cual fue obtenida a partir de los resultados de diferentes estudios (De Gutiérrez et al., 2005; Ghaffar et al., 2020; Islam & Ahmed, 2018; Khedari et al., 2005; Kim et al., 2012; Z. Li et al., 2006; Page et al., 2017, 2019; F. M. R. do. Santos et al., 2016; Sawsen et al., 2015; Zakaria et al., 2015, 2017). Esta reducción puede estar relacionada con la presencia de porosidades dentro del compuesto, formadas tanto por la congestión o agrupamiento de las fibras que altera la unión fibra-matriz produciendo vacíos, o por la porosidad natural de las fibras vegetales que actúan como generadores de fallas cuando se aplican esfuerzos de compresión (Fiore et al., 2015; Hwang et al., 2016). Ramakrishna et al. (Ramakrishna & Sundararajan, 2005b) evaluaron este efecto en compuestos cementosos reforzados con distintas fibras (coco, sisal, yute y cáñamo), evidenciando que en todos los casos la resistencia a la compresión de los compuestos era menor que la del mortero de referencia. A pesar de que la inclusión de las fibras vegetales cortas reduce la resistencia a la compresión, se ha observado que la presencia de estas fibras evita que ocurra una falla repentina en el compuesto, debido a que la adherencia fibra-matriz provee una

deformación más lenta y progresiva (Herrera, 2020). En cuanto a las fibras largas, las pocas investigaciones donde se evalúa la resistencia a la compresión han sido enfocadas principalmente en refuerzos externos de columnas con tejidos vegetales como el lino. Messiry et al. (Messiry et al., 2017) desarrollaron un hormigón reforzado externamente con este tejido revelando que el compuesto aumentó la resistencia a la compresión hasta por un factor de 4. El refuerzo externo aumenta la resistencia a la compresión uniaxial del compuesto debido al efecto de encofrado que genera la fibra, la cual al encontrarse en el exterior del elemento restringe su deformación radial por la alta resistencia a la tensión del tejido (Mukhopadhyay & Bhattacharjee, 2016).

Figura 6

Efecto de la longitud de las fibras sobre el comportamiento mecánico de los compuestos reforzados.



El buen comportamiento a tensión de los compuestos reforzados con fibras vegetales largas y cortas (figura 6c) es a causa de las propiedades mecánicas de las fibras y a los esfuerzos de

adherencia producidos dentro de la matriz. Las fibras cortas que generaron mayores aumentos en la resistencia a la tensión del compuesto fueron las de sisal y yute (Kim et al., 2012; Mukhopadhyay & Bhattacharjee, 2016; F. M. R. do. Santos et al., 2016; Vidal, 2011; Zakaria et al., 2015, 2017)(Frazão et al., 2018; Islam & Ahmed, 2018; Kim et al., 2012; F. M. R. do. Santos et al., 2016; Zakaria et al., 2015, 2017). Por ejemplo, Zacaria et al. (Zakaria et al., 2015, 2017) demostraron que el refuerzo de las matrices cementicias con fibras de yute aumenta (31-34%) la resistencia a la tensión del compuesto, mientras que Santos et al. (F. M. R. do. Santos et al., 2016) evidenció una mejora del 47% con la inclusión de fibras cortas de sisal. Cuando las fibras largas son utilizadas en forma de hilos unidireccionales, se consigue una mejor distribución dentro del compuesto y adherencia fibra-matriz, lo cual disminuye la velocidad de propagación de las grietas. Mientras que, cuando se utilizan como tejido dentro de la matriz o como recubrimiento externo es mayor el incremento en la ductilidad del compuesto, debido a que cuando el elemento se somete a solicitaciones (cargas) el tejido se tensiona confinando la matriz evitando su falla repentina (Boulos et al., 2018; Ferrara et al., 2019; Frazão et al., 2018; Mercedes et al., 2018). Olivito et al. (Olivito et al., 2014) reforzaron un compuesto cementoso con tejidos de sisal y lino, donde evaluaron tres zonas en la curva esfuerzo-deformación del compuesto (Figura 5a), mostrando inicialmente una disminución del módulo de Young por la posible presencia de porosidades en la matriz, seguido de una mejor distribución de esfuerzos al formarse un sistema progresivo de microgrietas, donde las fibras mantenían unidas las partes de la matriz mejorando la resistencia a la tensión del compuesto. Finalmente, cuando los tejidos no lograron transmitir más las tensiones el efecto de puente de las fibras evitó la falla repentina del compuesto.

El efecto del refuerzo de fibras vegetales en la tenacidad de los compuestos reforzados es mostrado en la figura 6d (de Andrade Silva et al., 2010; A. Hakamy et al., 2015; Z. Li et al., 2007;

Nagahama et al., 2015; Savastano et al., 2009; F. de A. Silva et al., 2010; Wei & Meyer, 2016). Este parámetro se suele definir como la capacidad que tiene un material de absorber energía de deformación, evitando el colapso total de un elemento y en general es calculado como la energía absorbida hasta el punto de rotura durante el ensayo de flexión dividida por el área de la sección transversal de la probeta, o el área bajo la curva esfuerzo-deformación. Los resultados de los estudios analizados permiten concluir que las fibras largas proveen un mejor comportamiento de tenacidad en el compuesto que las fibras cortas. Esta mejora en la ductilidad se da cuando las fibras detienen la extensión de las grietas generando un aumento en la capacidad de absorción de energía del compuesto, teniendo una relación directamente proporcional entre la longitud-contenido de fibra y la tenacidad (Onuaguluchi & Banthia, 2016). Entre las fibras investigadas, los tejidos de cáñamo son los que confieren un mejor comportamiento del compuesto frente a esta propiedad. Hakamy et al. (A. Hakamy et al., 2015) exponen que la alta resistencia a la flexión de las telas de cáñamo utilizadas como recubrimiento de la matriz cementicia incrementó la disipación de energía en la desviación de la grieta dentro de la interfaz fibra-matriz, mejorando la tenacidad en un 302% del elemento reforzado.

A pesar de las mejoras significativas que aportan las fibras vegetales en las propiedades mecánicas de los compuestos cementosos, la mayoría de los autores convergen en concluir que son necesarias más investigaciones principalmente en el tema de la durabilidad a largo plazo del compuesto debido a la biodegradabilidad de las fibras, para así poder implementar este material como una opción de refuerzo estructural.

5. Aplicaciones de las Fibras Vegetales en Materiales Compuestos de Matriz Cementosa

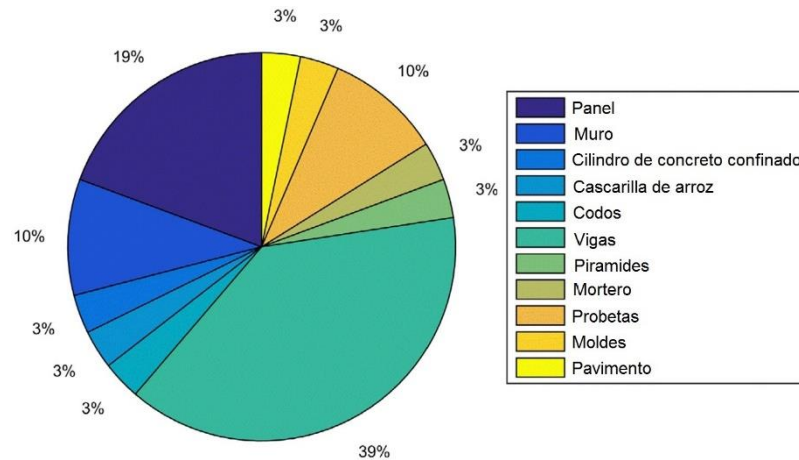
Las fibras vegetales mencionadas en los capítulos anteriores han sido estudiadas en al menos 40 países debido a su disponibilidad y propiedades mecánicas (Juarez et al. 2003). Uno de los enfoques de estas investigaciones está relacionado con el uso de las fibras como posible refuerzo de matrices cementicias. Las mejoras en las propiedades mecánicas de los compuestos expuestas en el capítulo anterior como la resistencia a la flexión, incremento en la resistencia a la tracción y aportes en la resistencia a la tenacidad, ha llevado a postular estas fibras como una opción favorable para aplicaciones en refuerzo de elementos estructurales primarios y secundarios. Los elementos primarios conforman el esqueleto de una edificación aportándole resistencia, ductilidad y rigidez a la estructura, siendo diseñados para resistir cargas estáticas y dinámicas (p.ej. vigas y columnas), mientras que los elementos secundarios no hacen parte del sistema estructural de la edificación (p.ej. muros divisores, cubiertas, baldosas, etc.)

5.1 Elementos Estructurales Primarios

Las aplicaciones de refuerzo con fibras vegetales en elementos estructurales primarios se han relacionado principalmente con la reparación y fabricación de vigas, esto a razón de la importancia que ha venido tomando la implementación de materiales de construcción ligeros, con buenas propiedades mecánicas y respetuosos con el medio ambiente (Fiore et al., 2015; Huang et al., 2016; Jirawattanasomkul et al., 2020; Segetin et al., 2007; Sen & Reddy, 2014a, 2014b; Yan, 2016; Yan & Chouw, 2014a; Zhou et al., 2013). En el trabajo realizado por Thomas y Stalin (Thomas & Jose, 2019) se muestran las aplicaciones de la fibra de sisal en refuerzo de elementos estructurales de hormigón, donde se destacan las vigas al ser uno de los elementos más estudiados siendo parte del 39% de la contribución total (figura 7).

Figura 7

Aplicaciones de refuerzo de fibras de sisal en elementos matrices de concreto.



Nota. Figura a) Adaptado de “Review on the application of sisal fibre reinforced concrete” (p.7), por B. Thomas, Y. Jose, 2019, Evolutionary Intelligence.

Giuseppe et al. (Giuseppe & Guadagnuolo, 2020) presentaron en su investigación un diseño de vigas de mampostería de ladrillos de arcilla reforzados externamente con tejido de lino, demostrando ser una alternativa válida para la construcción y mantenimiento de edificaciones, ya que podían resistir momentos flectores en los planos horizontales y verticales. Por otro lado, Huang et al. (Huang et al., 2016) evaluaron prototipos de vigas de hormigón armado reforzadas externamente con tejidos de lino, exponiendo una mejora significativa en la carga última, deflexión y ductilidad del elemento comparadas con una viga convencional, planteando que podría ser una buena alternativa como refuerzo de estructuras deterioradas. Otros trabajos se han orientado en el estudio de la durabilidad de las fibras cortas como refuerzo interno de vigas, por ejemplo, Ramakrishna et al. (Ramakrishna & Sundararajan, 2005b) estudiaron la durabilidad de las fibras de coco, sisal y yute como refuerzo, evidenciando que con el tiempo se presentó una disminución en la resistencia a la compresión y tracción de los compuestos reforzados. Así mismo, en el trabajo

de Yan et al. (Yan et al., 2015) implementaron de manera simultánea el refuerzo de fibras cortas de coco en el interior y tejidos de lino en el exterior del compuesto para fabricar prototipos de vigas, manifestando que la resistencia a la flexión, deflexión y tenacidad de las muestras reforzadas mejoraron proporcionalmente a medida que se aumentaban las capas de refuerzo del tejido. Los autores concluyeron que este tipo de fibras vegetales podrían ser una opción adecuada para el refuerzo de vigas en estructuras existentes de hormigón y mampostería.

Otras de las potenciales aplicaciones de estos elementos estructurales se han dirigido en el refuerzo de columnas de matriz cementosa (Ghalieh et al., 2017; Tan et al., 2017; Yan, 2016; Yan & Chouw, 2013a, 2014b). Yan et al. (J. Chen & Chouw, 2016; Yan et al., 2014; Yan & Chouw, 2013b) evaluaron columnas de hormigón reforzadas con fibras de coco encofradas a la vez con tubos de polímero reforzadas con tejido bidireccional de lino, demostrando en las pruebas de compresión que ante la falla el hormigón conservó cierta integridad gracias a los mecanismos de refuerzo de las fibras que retardan la propagación de las grietas, junto con un incremento adicional de 36.5% en la carga máxima en las pruebas de flexión. Este tipo de estudios ha llevado a diseñar prototipos aplicados en entornos cotidianos, como el elemento tipo columna de hormigón armado reforzado con 0.8% de fibras de coco y sisal, producido por Bragança et al. (Bragança M, Bonato MM, Portella KF, Bronholo JL, Vieira ME, 2014). Dicho prototipo ha sido utilizado para sustentar cables de distribución de corriente eléctrica, presentando una alta resistencia al impacto debido a la contribución del refuerzo en términos de capacidad de absorción de energía.

Otro de los elementos primarios estudiados para ser reforzados con fibras vegetales son los muros estructurales sometidos a cargas estáticas y dinámicas, principalmente con la finalidad de ser utilizados en la construcción de muros resistentes y sostenibles económicamente (Menna et al., 2015; Mercedes et al., 2020; Oscar A. Cevallos et al., 2015). Ali et al. (M. Ali et al., 2013)

construyeron un muro de bloques reforzados con fibras cortas de coco y postensado internamente con cuerdas de coco. Bajo cargas laterales que simulaban acciones sísmicas, los elementos mostraron una buena disipación de energía histórica, convirtiéndolos en una opción adecuada para la construcción de viviendas económicas resistentes a terremotos. Por otro lado, después de 15 meses de la construcción de estos muros Tang et al. (Tang et al., 2014) estudiaron el comportamiento residual de los bloques reforzados que lo conformaban. Notando en los ensayos realizados un aumento de 3% en la resistencia a la compresión y 6% en la resistencia al corte, concluyendo que las estructuras de bloques entrelazadas tienen potencial para ser utilizadas continuamente después de varios sismos si no se presentan daños visibles en los bloques.

5.2 Elementos Estructurales Secundarios

Entre los elementos estructurales secundarios se encuentran los muros de mampostería caracterizados por no estar sometidos a altas cargas, utilizados principalmente como muros divisores o de fachadas, paredes delgadas, cerramientos de edificios, chapas planas y componentes prefabricados (Roma et al., 2008). El refuerzo con fibras vegetales para la fabricación de este tipo de elementos se ha venido usando como una alternativa adecuada (Asasutjarit et al., 2007; Cevallos & Olivito, 2015; Josep Claramunt et al., 2016; Fidelis et al., 2014; Olivito et al., 2014) Por ejemplo, en Brasil fue construido un prototipo de viviendas asequibles con paneles de pared de mortero reforzado con fibras de coco, demostrando una buena resistencia a la compresión para este tipo de viviendas (6.5 MPa) y un rendimiento de aislamiento térmico similar al de los paneles de hormigón convencional (Agopyan et al., 2005). Por otro lado, Olivito et al. (Olivito et al., 2014) exponen que el refuerzo de un muro de mampostería con fibras de lino, además de mejorar la ductilidad del compuesto, proporcionaban un mejor desarrollo de anclaje dentro de la matriz que los refuerzos realizados con fibras de vidrio. Este tipo de estudios han permitido abrir las brechas frente al desarrollo de nuevos materiales para uso en componentes de mampostería presentando un mayor

rendimiento y sostenibilidad que los utilizados convencionalmente, con la gran ventaja de que estos materiales presentan una menor huella de carbono (Scrucca et al., 2020). En relación a esto, Claramunt et al. (Josep Claramunt et al., 2016) fabricaron placas de fachada ventilada con cemento portland reforzado con fibras de lino, consiguiendo un componente más ligero y con buen rendimiento mecánico. En su estudio, estimaron la huella de CO₂ para varios materiales utilizados normalmente en placas de fachada notando que la matriz cementosa reforzada era la que presentaba menor huella de carbono con una emisión de 7.5kg CO₂.

Otra de las aplicaciones en las que se ha reportado mayor cantidad de avances y estudios es en la producción de tejas para cubiertas. Desde 1970 los primeros enfoques en el uso de fibras vegetales como refuerzo estructural fue en el desarrollo de techos, puesto que su costo era más accesible y presentaban mejor calidad y durabilidad que los techos fabricados tradicionalmente (Lima & Barros, 2017). Desde entonces se han venido desarrollando mejoras y optimizaciones en la composición y procesos de fabricación de estas tejas (De Gutiérrez et al., 2005; A. Hakamy et al., 2015; Ahmad Hakamy et al., 2018; Schabowicz et al., 2018; Teixeira et al., 2014). Tonoli et al. (Tonoli et al., 2010) emplearon una tecnología de automatización en la fabricación de tejas que mejoraba la producción y control de calidad, junto con un proceso de carbonatación acelerada que disminuyó la agresividad de la matriz en las fibras de sisal, logrando incrementar la capacidad de flexión y durabilidad de las tejas. Las investigaciones sobre este tipo de elementos se han enfocado en la búsqueda de fibras de refuerzo favorables con el medio ambiente y disponibles a bajo costo. Por ejemplo, Delvasto et al. (Delvasto et al., 2010) implementaron una tecnología al vacío para fabricar láminas de techo corrugado reforzadas con fibras de fique. El desarrollo de este estudio se enfocó en fomentar una metodología de bajo costo para aportar en la construcción de viviendas de mampostería en áreas rurales de la región. Otros estudios han demostrado que el refuerzo con

fibras vegetales en la construcción de edificios no solo es factible, sino que también puede reducir los costos de manipulación de materiales y la transferencia de calor en los edificios. Khedari et al. (Khedari et al., 2005) mostraron que los bloques y suelos de cemento reforzados con fibras de coco eran más livianos y presentaban una menor conductividad térmica. Por otra parte, Juárez et al. (Juárez et al., 2007) evaluaron la opción de desarrollar un compuesto reforzado con fibras vegetales como una alternativa de material para viviendas en las zonas rurales de la zona isleña de México. Los resultados indicaron que la fibra, a pesar de presentar una alta capacidad de tracción, se deterioraba severamente en el ambiente al que estaba expuesto. Sin embargo, planteaban que, si se utilizaba una parafina para proteger la fibra o un aditivo puzolánico como cenizas volantes para modificar la matriz, el compuesto podría tener un mejor comportamiento en los ambientes agresivos de la zona. Estas deficiencias en la durabilidad han sido un obstáculo importante que deben superarse para la comercialización exitosa de este tipo de materiales, aun así, la implementación de estas fibras en elementos estructurales secundarios son el enfoque que ha tenido mayores avances y estudios en comparación con los refuerzos de elementos primarios, al ser una buena alternativa en países en desarrollo donde la falta de viviendas es considerable (Savastano Junior & Pimentel, 2000).

De las aplicaciones de cada elemento estructural mostradas anteriormente, se logró catalogar cada compuesto según el nivel de maduración tecnológica o TRL por sus siglas en inglés (Technology Readiness Levels). La NASA divide cada nivel de madurez según la etapa en la que se encuentran los componentes; aquellos que solo se han desarrollado a nivel de investigación o académico tienen un TRL bajo, el TRL de rango medio a alto se refiere a prototipos o componentes listos que se pueden ampliar con éxito y por último los componentes que ya son aplicados como innovación en un entorno real cuentan con un TRL más alto (Mai, 2015)(Colciencias, 2018). De

los compuestos cementosos reforzados con fibras vegetales, los elementos secundarios presentan un TRL más alto de aproximadamente 7, puesto que ya son utilizados en construcción de viviendas con muros de mampostería y techos reforzados con fibras. Por otro lado, los elementos primarios como vigas y columnas aún se encuentran en prototipos de laboratorio, ajustándose a un TRL igual a 4.

6. Conclusiones

A partir de los estudios revisados durante el proyecto relacionados con el uso de fibras vegetales como refuerzo en compuestos de matriz cementosa, se puede constatar las siguientes conclusiones:

Mediante el análisis cualitativo y cuantitativo de los estudios revisados se identificó que la fibra de sisal es la más utilizada como refuerzo de matrices cementicias, debido a que presenta buenas propiedades mecánicas y además es la fibra más cultivada alrededor del mundo. Por otro lado, la fibra de lino a pesar de no ser tan cultivada como la de sisal, también se ha reportado en diversos estudios como alternativa de refuerzo en matrices cementicias principalmente en forma de tejidos para refuerzo externo; lo anterior debido a su alta resistencia a la tensión la cual restringe la propagación de grietas dentro de la matriz. No obstante, los estudios donde implementan las fibras como el cáñamo, coco, yute, eucalipto y fique han venido tomando fuerza como una opción de refuerzo adecuada para compuestos de matriz cementosa.

Los tratamientos más utilizados para modificar la durabilidad y propiedades mecánicas de los compuestos reforzados de matriz cementosa son la alcalinización, silanización, hornificación, adiciones puzolánicas y carbonatación acelerada. Entre estos tratamientos, se destacan las modificaciones realizadas a la matriz, que tienen como función disminuir la alcalinidad de la pasta cementicia mejorando la interacción de las fibras dentro del compuesto y aumentando la tenacidad

de la matriz al reducir la porosidad presente. Igualmente, la hornificación es también utilizada en varios estudios como un pretratamiento para las fibras el cual es empleado simultáneamente con los tratamientos realizados a las matrices, generando un efecto sinérgico en la estabilidad dimensional de la fibra y su adherencia con la matriz.

Se evidenció una correlación entre la longitud de la fibra y las propiedades mecánicas del compuesto reforzado de matriz cementicia. La resistencia a la flexión, tensión y tenacidad de los compuestos aumenta con la adición de las fibras cortas y largas, debido a la mejora en la distribución de esfuerzos, absorción de energía y comportamiento post-agrietamiento del compuesto. Sin embargo, la resistencia a la compresión se ve afectada con la inclusión de fibras cortas, esto debido a la formación de porosidades dentro la matriz. Por otro lado, las fibras largas al ser utilizadas como un refuerzo externo (encofrado) mejoran la resistencia a la compresión de los compuestos evitando la deformación radial del elemento.

Se identificó que el uso de refuerzo de fibras vegetales en la industria de la construcción ha tenido mayores aplicaciones en elementos estructurales secundarios reforzados con fibras cortas, entre los cuales se destacan las tejas utilizadas en cubiertas de viviendas presentado un TRL 7. En contraste, los elementos estructurales primarios como vigas y columnas reforzados con fibras largas continúan en prototipos de laboratorio ajustándose a un TRL 4. Debido a que estos elementos al tener mayores requerimientos de resistencia y durabilidad por su función en las edificaciones, ha dificultado llevar a cabo la fabricación de componentes a gran escala por la falta de información relacionada con la durabilidad de las fibras, lo cual podría afectar a largo plazo las edificaciones provocando su deterioro o colapso.

Referencias Bibliográficas

- Abiola. (2014). Compuestos de fibrocemento natural. *Universidad Federal de Agricultura, Abeokuta, Nigeria*.
- Agopyan, V., Savastano, H., John, V. M., & Cincotto, M. A. (2005). Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004>
- Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabbar, M., Hussain, T., Militky, J., & Baheti, V. (2018). Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—A review. *Journal of Industrial Textiles*, 47(8), 2153–2183. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>
- Ali, M., Briet, R., & Chouw, N. (2013). Dynamic response of mortar-free interlocking structures. *Construction and Building Materials*, 42, 168–189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.010>
- Almeida, A. E. F. S., Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., & Savastano, H. (2013). Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites*, 42, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001>
- Andrade, F. De, Mobasher, B., Soranakom, C., Dias, R., & Filho, T. (2011). Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites. *Cement & Concrete Composites*, 33, 814–823. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.003>
- Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- Arsène, Jr, M.-A. S., Allameh, H., Ghavami, S. M., & K. Soboyejo, W. O. (2003). Cementitious composites reinforced with vegetable fibers. *Proceedings of the 1st Interamerican Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in the Eco-Construction and Infrastructure (IAC-NOCMAT), November 2003*, 13–16.

- Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmati, B., & Shin, U. C. (2007). Development of coconut coir-based lightweight cement board. *Construction and Building Materials*, *21*(2), 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.028>
- Asprone, D., Durante, M., Prota, A., & Manfredi, G. (2011). Potential of structural pozzolanic matrix-hemp fiber grid composites. *Construction and Building Materials*, *25*(6), 2867–2874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.046>
- Ballesteros, J. E. M., dos Santos, V., Mármol, G., Frías, M., & Fiorelli, J. (2017). Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. *Cellulose*, *24*(5), 2275–2286. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1253-6>
- Ballesteros, J. E. M., Mármol, G., Filomeno, R., Rodier, L., Savastano, H., & Fiorelli, J. (2019). Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, *205*, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007>
- Ballesteros, J. E. M., Santos, S. F., Mármol, G., Savastano, H., & Fiorelli, J. (2015). Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, *100*, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.044>
- Barham, W. S., Albiss, B., & Lataifeh, O. (2021). Influence of magnetic field treated water on the compressive strength and bond strength of concrete containing silica fume. *Journal of Building Engineering*, *33*(January 2020), 101544. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101544>
- Benin, S. R., & Bright, R. (2020). A review on mechanical characterization of polymer matrix composites and effects reinforced with various natural fibres. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.259>
- Blankenhorn, P. R., Silsbee, M. R., & DiCola, M. (2001). Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of hemp fibre composites. *Cement and Concrete Research* *31*, *18*(9), 737–754. <https://doi.org/10.1163/156855412X629583>
- Boghossian, E., & Wegner, L. D. (2008). Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking

- in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 929–937.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.003>
- Borsoi, C., Menin, C., Lavoratti, A., & Zattera, A. J. (2019). Grape stalk fibers as reinforcing filler for polymer composites with a polystyrene matrix. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(18), 1–10. <https://doi.org/10.1002/app.47427>
- Boulos, L., Foruzanmehr, M. R., & Robert, M. (2018). Evolution of the interfacial transition zone and the degradation mechanism of zirconia treated flax fabric reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 190, 120–130.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.104>
- Bragança M, Bonato MM, Portella KF, Bronholo JL, Vieira ME, S. J. (2014). Desempenho de postes de concreto com adições orgânicas e fotocatalíticas. In *Espaço Energia 20* (pp. 18–24).
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1–3), 3–9.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>
- Carvalho, P., Ferreira, R., Aparecida, L., & Pasquini, D. (2020). Characterization and properties of cementitious composites with cellulose fiber, silica fume and latex. *Construction and Building Materials*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119602>
- Castellanos, L. J., Blanco-Tirado, C., Hinestroza, J. P., & Combariza, M. Y. (2012). In situ synthesis of gold nanoparticles using fique natural fibers as template. *Cellulose*, 19(6), 1933–1943. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9763-8>
- Cevallos, O. A., & Olivito, R. S. (2015). Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*, 69, 256–266.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.004>
- Chakraborty, S., Kundu, S. P., Roy, A., Adhikari, B., & Majumder, S. B. (2013). Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 49, 214–222.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.025>

- Chand, N., Tiwary, R. K., & Rohatgi, P. K. (1988). Bibliography Resource structure properties of natural cellulosic fibres - an annotated bibliography. *Journal of Materials Science*, 23(2), 381–387. <https://doi.org/10.1007/BF01174659>
- Chen, B., Shao, H., Li, B., & Li, Z. (2020). Influence of silane on hydration characteristics and mechanical properties of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 113(January). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103743>
- Chen, J., & Chouw, N. (2016). Nonlinear flexural behaviour of flax FRP double tube confined coconut fibre reinforced concrete. *JMADE*, 93, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.069>
- Claramunt, J., Ardanuy, M., & García-Hortal, J. A. (2010). Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.057>
- Claramunt, Josep, Ardanuy, M., García-Hortal, J. A., & Filho, R. D. T. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003>
- Claramunt, Josep, Fernández-Carrasco, L. J., Ventura, H., & Ardanuy, M. (2016). Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. *Construction and Building Materials*, 115, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.044>
- Colciencias, D. A. de C. T. e I. (2018). *ANEXO 1. TECHNOLOGY READINESS LEVELS - TRL*. 6–9.
- Dash, D., Samanta, S., Gautam, S. S., & Murlidhar, M. (2013). Mechanical Characterizations of Natural Fiber Reinforced Composite Materials. *International Journal of Advanced Materials Manufacturing and Characterization*, 3(1), 275–279. <https://doi.org/10.11127/ijammc.2013.02.050>
- de Andrade Silva, F., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2010). Fatigue behavior of sisal fiber reinforced cement composites. *Materials Science and Engineering A*, 527(21–22), 5507–

5513. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.007>

De Gutiérrez, R. M., Díaz, L. N., & Delvasto, S. (2005). Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 593–598.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.010>

Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets.

Construction and Building Materials, 24(2), 187–192.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010>

Dittenber, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and*

Manufacturing, 43(8), 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>

Duval, A., Bourmaud, A., Augier, L., & Baley, C. (2011). Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Materials Letters*, 65(4), 797–800.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.11.053>

E, H. W., & A.G, B. (1984). Eucalypts for wood production. *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Sydney*.

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.

<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Ferrara, G., Coppola, B., Di Maio, L., Incarnato, L., & Martinelli, E. (2019). Tensile strength of flax fabrics to be used as reinforcement in cement-based composites: experimental tests

under different environmental exposures. *Composites Part B: Engineering*, 168(November 2018), 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.062>

Ferreira, S. R., Lima, P. R. L., Silva, F. A., & Toledo Filho, R. D. (2012). Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland.

Revista Materia, 17(2), 1024–1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>

Ferreira, S. R., Silva, F. de A., Lima, R. L., & Toledo Filho, R. D. (2017). Effect of hornification

- on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. *Construction and Building Materials*, 139, 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>
- Fidelis, M. E. A., De Andrade Silva, F., & Filho, R. D. T. (2014). The influence of fiber treatment on the mechanical behavior of jute textile reinforced concrete. *Key Engineering Materials*, 600, 469–474. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.469>
- Filho, J. D. A. M., Silva, F. D. A., & Toledo Filho, R. D. (2013). Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. *Cement and Concrete Composites*, 40, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>
- Fiore, V., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 68, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025>
- Fonseca, C. S., Silva, M. F., Mendes, R. F., Hein, P. R. G., Zangiaco, A. L., Savastano, H., & Tonoli, G. H. D. (2019). Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 211, 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.236>
- Frazão, C., Barros, J., Toledo Filho, R., Ferreira, S., & Gonçalves, D. (2018). Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 86, 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.008>
- Gañán, P., & Mondragon, I. (2004). Figue fiber-reinforced polyester composites: Effects of fiber surface treatments on mechanical behavior. *Journal of Materials Science*, 39(9), 3121–3128. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025841.67124.c3>
- Ghaffar, S. H., Al-Kheetan, M., Ewens, P., Wang, T., & Zhuang, J. (2020). Investigation of the interfacial bonding between flax/wool twine and various cementitious matrices in mortar composites. *Construction and Building Materials*, 239, 117833. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117833>
- Ghalieh, L., Awwad, E., Saad, G., & Mabsout, M. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Concrete

- Columns Wrapped with Hemp Fiber Reinforced Polymer – An Experimental Study. *Procedia Engineering*, 200, 440–447. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.062>
- Giuseppe, F., & Guadagnuolo, M. (2020). *Simplified Design of Masonry Ring-Beams Reinforced by Flax Fibers for Existing*.
- Godara, M. S. S. (2019). Effect of chemical modification of fiber surface on natural fiber composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3428–3434. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.270>
- Gómez Hoyos, C., & Vázquez, A. (2012). Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3120–3130. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.027>
- Hakamy, A., Shaikh, F., & Low, I. M. (2013). Microstructures and mechanical properties of hemp fabric reinforced organoclay-cement nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 49, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.028>
- Hakamy, A., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2015). Thermal and mechanical properties of NaOH treated hemp fabric and calcined nanoclay-reinforced cement nanocomposites. *Materials and Design*, 80, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.003>
- Hakamy, Ahmad, Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2018). High-performance natural fiber-reinforced cement composites. *Advances in Ceramic Matrix Composites: Second Edition*, 277–305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102166-8.00012-8>
- Halvaei, M., Jamshidi, M., & Latifi, M. (2014). Application of low modulus polymeric fibers in engineered cementitious composites. *Journal of Industrial Textiles*, 43(4), 511–524. <https://doi.org/10.1177/1528083712465881>
- Han, W., Zhao, C., Elder, T., Chen, K., Yang, R., Kim, D., Pu, Y., Hsieh, J., & Ragauskas, A. J. (2012). Study on the modification of bleached eucalyptus kraft pulp using birch xylan. *Carbohydrate Polymers*, 88(2), 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.01.025>
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of

- fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- Herrera, J. (2020). Desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para el empleo de estructuras en ambiente agresivo. *Universidad Industrial de Santander*, 1, 239. <https://doi.org/10.1155/2010/706872>
- Hidalgo-Salazar, M. A., & Correa, J. P. (2018). Mechanical and thermal properties of biocomposites from nonwoven industrial Fique fiber mats with Epoxy Resin and Linear Low Density Polyethylene. *Results in Physics*, 8, 461–467.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.025>
- Hidalgo-Salazar, M. A., Muñoz, M. F., & Mina, J. H. (2015). *Influence of Incorporation of Natural Fibers on the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Composites LDPE-Al Reinforced with Fique Fibers*. <https://doi.org/10.1155/2015/386325>
- Hidalgo, M. A., & Muñoz, M. F. (2010). Interacción interfacial del compuesto LDPE/A reforzado con fibra de fique: Influencia de la temperatura. *X Congreso Internacional de Metalúrgica y Materiales, NOVIEMBRE 2-5*, 4.
- Ho, M. P., Wang, H., Lee, J. H., Ho, C. K., Lau, K. T., Leng, J., & Hui, D. (2012). Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3549–3562. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>
- Hribernik, S., Stana Kleinschek, K., Rihm, R., Ganster, J., Fink, H. P., & Sfiligoj Smole, M. (2016). Tuning of cellulose fibres' structure and surface topography: Influence of swelling and various drying procedures. *Carbohydrate Polymers*, 148, 227–235.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.053>
- Huang, L., Yan, B., Yan, L., Xu, Q., Tan, H., & Kasal, B. (2016). Reinforced concrete beams strengthened with externally bonded natural flax FRP plates. *Composites Part B: Engineering*, 91, 569–578. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.014>
- Hwang, C. L., Tran, V. A., Hong, J. W., & Hsieh, Y. C. (2016). Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious

- composites. *Construction and Building Materials*, 127, 984–992.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.118>
- Inagaki, T., Schwanninger, M., Kato, R., Kurata, Y., Thanapase, W., Puthson, P., & Tsuchikawa, S. (2012). Eucalyptus camaldulensis density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 46(1–3), 143–155.
<https://doi.org/10.1007/s00226-010-0379-6>
- Islam, M. S., & Ahmed, S. J. (2018). Influence of jute fiber on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 189, 768–776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.048>
- Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Jirawattanasomkul, T., Likitlersuang, S., Wuttiwannasak, N., & Ueda, T. (2020). Structural behaviour of pre-damaged reinforced concrete beams strengthened with natural fibre reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 244(January), 112309.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112309>
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- Juarez, A., Lopez, C., & Rodriguez, P. (2003). Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. *Revista Ingenierías*, VII, 8.
- Juárez, C., Durán, A., Valdez, P., & Fajardo, G. (2007). Performance of “Agave lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and Environment*, 42(3), 1151–1157.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.005>
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites : An overview. *Composites Part B*, 43(7), 2883–2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>
- Karade, S. R. (2010). Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and*

- Building Materials*, 24(8), 1323–1330. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.003>
- Karthi, N., Kumaresan, K., Sathish, S., Gokulkumar, S., Prabhu, L., & Vigneshkumar, N. (2020). An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2828–2834. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>
- Khan, M., & Ali, M. (2019). Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres. *Construction and Building Materials*, 203, 174–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103>
- Khedari, J., Watsanasathaporn, P., & Hirunlabh, J. (2005). Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.042>
- Khorami, M., & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3661–3667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052>
- Kim, J., Park, C., Choi, Y., Lee, H., & Song, G. (2012). An investigation of mechanical properties of jute fiber-reinforced concrete. *RILEM Bookseries*, 2, 75–82. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2436-5_10
- Le Troëdec, M., Dalmay, P., Patapy, C., Peyratout, C., Smith, A., & Chotard, T. (2011). Mechanical properties of hemp-lime reinforced mortars: Influence of the chemical treatment of fibers. *Journal of Composite Materials*, 45(22), 2347–2357. <https://doi.org/10.1177/0021998311401088>
- Le Troëdec, Marianne, Peyratout, C. S., Smith, A., & Chotard, T. (2009). Influence of various chemical treatments on the interactions between hemp fibres and a lime matrix. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(10), 1861–1868. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.016>
- Li, Y., Mai, Y., & Ye, L. (2000). Sisal fibre and its composites : a review of recent developments. *Composites Science and Technology*, 60(2000), 2037–2055.

- Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2004). Compressive and flexural properties of hemp fiber reinforced concrete. *Fibers and Polymers*, 5(3), 187–197.
<https://doi.org/10.1007/BF02902998>
- Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2007). Cement composites reinforced with surface modified coir fibers. *Journal of Composite Materials*, 41(12), 1445–1457.
<https://doi.org/10.1177/0021998306068083>
- Li, Z., Wang, X., & Wang, L. (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(3), 497–505.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.032>
- Lima, P., & Barros, J. (2017). Recent Advances on Green Concrete for Structural Purposes. *Construction and Building Materials*, 25(1), 1–2. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56797-6>
- Lino, D., Fernando, P. L., & Lino, D. (1941). El Cultivo de Lino para Fibra. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 4(13), 1431–1457.
- Liu, Y., Ma, Y., Yu, J., Zhuang, J., Wu, S., & Tong, J. (2018). Development and characterization of alkali treated abaca fiber reinforced friction composites. *Composite Interfaces*, 26(1), 67–82. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1472456>
- Luo, X. L., Zhu, J. Y., Gleisner, R., & Zhan, H. Y. (2011). Effects of wet-pressing-induced fiber hornification on enzymatic saccharification of lignocelluloses. *Cellulose*, 18(4), 1055–1062.
<https://doi.org/10.1007/s10570-011-9541-z>
- Mai, T. (2015). *Technology Readiness Level*. NASA.
http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html
- Menna, C., Asprone, D., Durante, M., Zinno, A., Balsamo, A., & Prota, A. (2015). Structural behaviour of masonry panels strengthened with an innovative hemp fibre composite grid. *Construction and Building Materials*, 100, 111–121.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.051>
- Mercedes Cedeño, L. E. (2019). Análisis del comportamiento frente acciones cíclicas de muros

de mampostería reforzados con materiales compuestos de matriz inorgánica y tejidos de fibras vegetales. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*.

<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/170439#.XodWzqlWTnA.mendeley>

- Mercedes, L., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2020). In-plane cyclic loading of masonry walls strengthened by vegetal-fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Engineering Structures*, 221(July), 111097. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111097>
- Mercedes, L., Gil, L., & Bernat-Maso, E. (2018). Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Construction and Building Materials*, 175, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>
- Messiry, M., Tarfawy, S., & Deeb, R. (2017). Enhanced impact properties of cementitious composites reinforced with pultruded flax/polymeric matrix fabric. *Alexandria Engineering Journal*, 56(3), 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.032>
- Morton, J. H., Cooke, T., & Akers, S. A. S. (2010). Performance of slash pine fibers in fiber cement products. *Construction and Building Materials*, 24(2), 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.015>
- Mukhopadhyay, S., & Bhattacharjee, B. (2016). Influence of fibre dispersion on compression strength of banana fibres reinforced concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 45(5), 957–964. <https://doi.org/10.1177/1528083714545394>
- Nagahama, K., Souza, A., & Lima, P. (2015). Finite strip modeling of cementitious laminates reinforced with sisal fibers. *Cement and Concrete Composites*, 63, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.013>
- Olivito, R. S., Cevallos, O. A., & Carrozzini, A. (2014). Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. *Materials and Design*, 57, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.023>
- Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>

- Oscar A. Cevallos, Renato Olivito, & Rosamaria Codispoti. (2015). *Experimental Analysis of Repaired Masonry Elements with Flax-FRCM and PBO-FRCM Composites Subjected to Axial Bending Loads*. 491–503. <https://doi.org/10.3390/fib3040491>
- Pacheco, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Page, J., Khadraoui, F., Boutouil, M., & Gomina, M. (2017). Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers. *Construction and Building Materials*, 140, 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.124>
- Page, J., Khadraoui, F., Gomina, M., & Boutouil, M. (2019). Influence of different surface treatments on the water absorption capacity of flax fibres: Rheology of fresh reinforced-mortars and mechanical properties in the hardened state. *Construction and Building Materials*, 199, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.042>
- Pehanich, J. L., Blankenhorn, P. R., & Silsbee, M. R. (2004). Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 59–65. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00193-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00193-5)
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005a). Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005b). Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008>
- Ray, D., & Sarkar, B. K. (2001). Characterization of alkali-treated jute fibers for physical and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(7), 1013–1020. <https://doi.org/10.1002/app.1184>
- Rodríguez, O. J. (2020). *Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras*.

- Roma, L. C., Martello, L. S., & Savastano, H. (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*, 22(4), 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.001>
- Santos, F. M. R. do., Souza, T. F. d., Barquete, D. M., & Amado, F. D. R. (2016). Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste. *Construction and Building Materials*, 128, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.035>
- Santos, R. D. J., & Lima, P. R. L. (2015). Effect of treatment of sisal fiber on morphology, mechanical properties and fiber-cement bond strength. *Key Engineering Materials*, 634, 410–420. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.410>
- Santos, S. F., Schmidt, R., Almeida, A. E. F. S., Tonoli, G. H. D., & Savastano, H. (2015). Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, 56, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.007>
- Santos, V., Ceferino, G., Rempe, N., & Savastano, H. (2017). Definition of optimal parameters for supercritical carbonation treatment of vegetable fiber-cement composites at a very early age. *Construction and Building Materials*, 152, 424–433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.182>
- Savastano, H., Santos, S. F., Radonjic, M., & Soboyejo, W. O. (2009). Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.006>
- Savastano Junior, H., & Pimentel, L. L. (2000). Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(1), 103–110. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662000000100019>
- Sawsen, C., Fouzia, K., Mohamed, B., & Moussa, G. (2014). Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 54, 659–664. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.038>

- Sawsen, C., Fouzia, K., Mohamed, B., & Moussa, G. (2015). Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. *Construction and Building Materials*, 79, 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091>
- Schabowicz, K., Józwiak-Niedźwiedzka, D., Ranachowski, Z., Kudela, S., & Dvorak, T. (2018). Microstructural characterization of cellulose fibres in reinforced cement boards. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1068–1078. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.018>
- Scrucca, F., Ingrao, C., Maalouf, C., Moussa, T., Polidori, G., Messineo, A., Arcidiacono, C., & Asdrubali, F. (2020). Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings. *Environmental Impact Assessment Review*, 84(May), 106417. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106417>
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., & Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>
- Segetin, M., Ā, K. J., & Xu, X. (2007). *Harakeke reinforcement of soil – cement building materials : Manufacturability and properties*. 42, 3066–3079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.033>
- Sen, T., & Reddy, H. N. J. (2014a). Efficacy of bio derived jute FRP composite based technique for shear strength retrofitting of reinforced concrete beams and its comparative analysis with carbon and glass FRP shear retrofitting schemes. *Sustainable Cities and Society*, 13, 105–124. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.010>
- Sen, T., & Reddy, H. N. J. (2014b). Flexural strengthening of RC beams using natural sisal and artificial carbon and glass fabric reinforced composite system. *Sustainable Cities and Society*, 10, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.09.003>
- Shireesha, Y., & Nandipati, G. (2019). State of art review on natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 18, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.272>
- Shokrieh, M. M., Mahmoudi, A., & Shadkam, H. R. (2015). Hybrid polyvinyl alcohol and cellulose fiber pulp instead of asbestos fibers in cement-based composites. *Mechanics of*

- Composite Materials*, 51(2), 231–238. <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9494-7>
- Siddika, S., Mansura, F., Hasan, M., & Hassan, A. (2014). *Effect of Reinforcement and Chemical Treatment of Fiber on the Properties of Jute-Coir Fiber Reinforced Hybrid Polypropylene Composites*. 15(5), 1023–1028. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1023-0>
- Silva, E. J. da, Marques, M. L., Velasco, F. G., Fornari Junior, C., Luzardo, F. M., & Tashima, M. M. (2017). A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 12(January 2016), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.04.003>
- Silva, F. de A., Filho, R. D. T., Filho, J. de A. M., & Fairbairn, E. de M. R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777–785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>
- Silva, F. de A., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2009). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>
- Soltan, D. G., das Neves, P., Olvera, A., Savastano Junior, H., & Li, V. C. (2017). Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. *Industrial Crops and Products*, 103, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.016>
- Summerscales, J., Dissanayake, N. P. J., Virk, A. S., & Hall, W. (2010). A review of bast fibres and their composites. Part 1 - Fibres as reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001>
- Tan, H., Yan, L., Huang, L., Wang, Y., Li, H., & Chen, J. (2017). *Behavior of Sisal Fiber Concrete Cylinders Externally Wrapped With Jute FRP*. <https://doi.org/10.1002/pc>
- Tang, Z., Ali, M., & Chouw, N. (2014). Residual compressive and shear strengths of novel coconut-fibre-reinforced-concrete interlocking blocks. *Construction and Building Materials*, 66, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.094>
- Teixeira, R. S., Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Savastano, H., Protásio, T. P., Toro, E. F.,

- Maldonado, J., Lahr, F. A. R., & Delvasto, S. (2014). Different ageing conditions on cementitious roofing tiles reinforced with alternative vegetable and synthetic fibres. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(3), 433–446. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0070-0>
- Thomas, B. C., & Jose, Y. S. (2019). Impact of sisal fiber reinforced concrete and its performance analysis : a review. *Evolutionary Intelligence*. <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00230-9>
- Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., Sanjuán, M. A., & England, G. L. (2005). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005>
- Tolêdo Romildo D., F. D., Ghavami, K., England, G. L., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 185–196. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5)
- Tonoli, G. H. D., Belgacem, M. N., Siqueira, G., Bras, J., Savastano, H., & Rocco Lahr, F. A. (2013). Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.004>
- Tonoli, G. H. D., Filho, U. P. R., Jr, H. S., Bras, J., Belgacem, M. N., & Lahr, F. A. R. (2009). Cellulose modified fibres in cement based composites. *Composites Part A*, 40(12), 2046–2053. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.016>
- Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Joaquim, A. P., & Savastano, H. (2010). Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. *Construction and Building Materials*, 24(2), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018>
- Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Savastano, H., Delvasto, S., Mejía De Gutiérrez, R., & Lopez De Murphy, M. D. M. (2011). Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013>
- Van de Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., & Verpoest, I. (2003).

- Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1241–1246. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00093-9)
- Vidal, C. (2011). *Historia y futuro de una fibra vegetal*. 1–48.
- Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., & Crerar, W. (2020). *Pre-treatment of flax fibers for use in rotationally molded biocomposites*. 2020. <https://doi.org/10.1177/0731684406072526>
- Wei, J., & Meyer, C. (2016). Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. *Cement and Concrete Research*, 81, 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.001>
- Xue, L., & Tabil, L. G. (2007). *Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites : A Review*. 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- Yan, L. (2016). Plain concrete cylinders and beams externally strengthened with natural flax fabric reinforced epoxy composites. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(6), 2083–2095. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0635-1>
- Yan, L., & Chouw, N. (2013a). Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete composite. *Materials and Design*, 52, 801–811. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.018>
- Yan, L., & Chouw, N. (2013b). Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column. *Construction and Building Materials*, 40, 1118–1127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.116>
- Yan, L., & Chouw, N. (2014a). *Dynamic and static properties of flax fibre reinforced polymer tube confined coir fibre reinforced concrete*. <https://doi.org/10.1177/0021998313488154>
- Yan, L., & Chouw, N. (2014b). Natural FRP tube confined fibre reinforced concrete under pure axial compression : A comparison with glass / carbon FRP. *Thin Walled Structures*, 82, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.04.013>
- Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014). Effect of column parameters on flax FRP confined coir fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 299–312.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.061>

Yan, L., Chouw, N., & Yuan, X. (2012). *Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment.*

<https://doi.org/10.1177/0731684412439494>

Yan, L., Su, S., & Chouw, N. (2015). Microstructure , fl exural properties and durability of coir fi bre reinforced concrete beams externally strengthened with fl ax FRP composites.

Composites Part B, 80, 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.011>

Zakaria, M., Ahmed, M., Hoque, M. M., & Hannan, A. (2015). Effect of jute yarn on the mechanical behavior of concrete composites. *SpringerPlus*, 4(1), 1–8.

<https://doi.org/10.1186/s40064-015-1504-7>

Zakaria, M., Ahmed, M., Hoque, M. M., & Islam, S. (2017). Scope of using jute fiber for the reinforcement of concrete material. *Textiles and Clothing Sustainability*, 2(1).

<https://doi.org/10.1186/s40689-016-0022-5>

Zhao, Z., Qu, X., Li, F., & Wei, J. (2018). Effects of steel slag and silica fume additions on compressive strength and thermal properties of lime-fly ash pastes. *Construction and Building Materials*, 183, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.220>

Zhou, X., Ghaffar, S. H., Dong, W., Oladiran, O., & Fan, M. (2013). Materia ls and Design Fracture and impact properties of short discrete jute fibre-reinforced cementitious composites. *JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN*, 49, 35–47.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.029>