

MONOGRAFÍA:

**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS NATURALES
PARA USOS EN CONCRETOS HIDRÁULICOS**

Monografía para optar al título de

INGENIERO CIVIL

Autores

YOSETH ESTIVEN ESGUERRA TORRES

LUIS ALFONSO FORERO VEGA

Director

MSC. RAMÓN DE JESÚS TORRES ORTEGA



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL.

CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.

2020

TRABAJO DE GRADO

Autores

YOSETH ESTIVEN ESGUERRA TORRES

LUIS ALFONSO FORERO VEGA

Director

MSC. RAMÓN DE JESÚS TORRES ORTEGA

Grupo de investigación

GEOTECNIA, MATERIALES, VIAS Y TRANSPORTE

(GEOMAVIT)

MATERIALES DE CONSTRUCCION

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. C.

2020

CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. DESARROLLO DE LA MONOGRAFÍA	11
2.1. FIBRAS COMERCIALES IMPLEMENTADAS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO	11
2.1.1. Tipos de fibra según su funcionalidad y geometría.....	14
2.1.1.1. Microfibras.	14
2.1.1.2. Macrofibras.....	14
2.1.2. Clasificación de las fibras según su material	15
2.1.2.1. Fibras de acero.....	15
2.1.2.1.1. <i>Propiedades físico-mecánicas.</i>	15
2.1.2.2. Fibras de vidrio.....	15
2.1.2.2.1. <i>Propiedades físico-mecánicas.</i>	16
2.1.2.3. Fibras sintéticas.	17
2.1.2.3.1. <i>Propiedades físico-mecánicas.</i>	17
2.1.2.4. Fibras naturales.....	18
2.1.2.4.1. <i>Estructura fisicoquímica de las fibras vegetales.</i>	19
2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECANICAS DE LAS FIBRAS NATURALES MÁS COMUNES A NIVEL MUNDIAL	24
2.2.1. Comparación físico-mecánica de fibras naturales.....	25
2.3. FIBRAS NATURALES COLOMBIANAS CON POTENCIAL PARA SER USADAS EN EL CONCRETO HIDRAULICO.	29
2.3.1. Comparación físico-mecánica de fibras naturales.....	32
2.4. FIBRAS NATURALES COLOMBIANAS CON POTENCIAL PARA SER USADAS EN EL CONCRETO HIDRAULICO UBICADAS EN LA REGIÓN CARIBE	37
2.4.1. Comparación físico-mecánica entre las fibras sintéticas presentes en el mercado y las fibras naturales autóctonas de la región caribe	38
3. CONCLUSIONES.....	40
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de fibras de vidrio.....	16
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de fibras sintéticas.	17
Tabla 3. Composición físico-química típica de la fibra de lino, junto con la densidad y la rigidez de tracción de los distintos componentes.....	22
Tabla 4. Fibras naturales ordenadas de acuerdo a su origen en la planta junto a sus parámetros microestructurales.	23
Tabla 5. Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales de origen vegetal más estudiadas a nivel mundial.	24
Tabla 6. Fibras presentes en el mercado colombiano.	30
Tabla 7. Propiedades físico-mecánicas de las fibras presentes en el mercado para usos en concretos hidráulicos.....	31
Tabla 8. Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales colombianas.....	32
Tabla 9. Fibras naturales localizadas en la región Caribe.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Visión general de las fibras naturales.....	19
Figura 2. Estructura de la fibra natural y organización microestructural de los tres componentes principales de una fibra natural.....	20
Figura 3. Esfuerzo a tensión de fibras naturales.....	26
Figura 4. Módulo de elasticidad de fibras naturales.....	27
Figura 5. Deformación de fibras naturales.....	28
Figura 6. Resistencia a la tracción de fibras naturales colombianas.....	33
Figura 7. Comparación resistencia a la tracción entre las fibras sintéticas y las fibras naturales.....	34
Figura 8. Módulo de elasticidad fibras naturales colombianas.....	35
Figura 9. Módulo de elasticidad fibras sintéticas vs fibras naturales.....	36
Figura 10. Resistencia a tracción fibras sintéticas vs fibras naturales de la región caribe.....	38
Figura 11. Módulo de elasticidad fibras sintéticas vs fibras naturales de la región caribe.....	39

RESUMEN

Hoy en día, existe la necesidad de investigar, identificar y producir materiales amigables con el medio ambiente, que tengan características físico-mecánicas aprovechables e importantes como lo son el bajo peso, baja corrosión, alta resistencia y que sean biodegradables, para poder reemplazar a aquellos materiales tradicionales que exigen un alto tiempo de descomposición.

En el presente trabajo se realizó una búsqueda de diferentes tipos y propiedades físico-mecánicas de fibras naturales utilizadas en todo el mundo como refuerzo en el concreto hidráulico y que responden a los diferentes comportamientos mecánicos presentados durante su vida útil, así como los presentados durante la etapa del fraguado.

Se realizó un análisis comparativo con base a parámetros físicos y mecánicos entre las fibras tradicionales o ya establecidas en el mercado para usos en concretos hidráulicos y las fibras encontradas en diferentes investigaciones en todo el mundo. Se identificaron las diferentes fibras naturales encontradas en Colombia, y con más prioridad en la región Caribe, con potencial para ser implementadas en concretos hidráulicos. Se encontró que, a nivel mundial, la hoja de piña presenta mejores propiedades mecánicas que el resto de las fibras naturales estudiadas, con una resistencia a la tracción promedio de 1020 MPa, un módulo de elasticidad de 58 GPa y una elongación promedio de 0,9%. En Colombia, las fibras de moriche y guérregue compiten con algunas fibras sintéticas establecidas en el mercado para usos en concretos hidráulicos, con valores de resistencia a la tracción promedio de 585,03 MPa y 249,11 MPa respectivamente, módulo de elasticidad promedio de 9,53 GPa y 5,85 GPa respectivamente y elongación de 40,57 % y 36,29 % respectivamente. Por último, en la región Caribe, el uso de la fibra de caña flecha podría ser eficiente al ser implementada en concretos hidráulicos, ya que presenta valores interesantes, una resistencia a la tracción promedio de 168,23 MPa, un módulo de elasticidad promedio de 3,53 GPa y una elongación promedio de 43,17 %. Es importante resaltar que en Colombia existe producción de piña, por lo que es recomendable que se realicen investigaciones referentes a las fibras de hoja de piña.

ABSTRACT

Nowadays, there is a need to investigate, identify and produce materials that are environment friendly, that have useful and important physical-mechanical characteristics such as low weight, low corrosion, high resistance and that are biodegradable, in order to replace those traditional materials that require a high decomposition time.

In the following work, a search was made of different types and physical-mechanical properties of natural fibers used throughout the world as reinforcement in hydraulic concrete and that respond to the different mechanical behaviors presented during their useful life, as well as those presented during the setting stage.

A comparative analysis was carried out based on physical and mechanical parameters between the traditional fibers or those already established in the market for uses in hydraulic concretes and the fibers found in different investigations around the world. The different natural fibers found in Colombia were identified, and with more priority in the Caribbean region, with the potential to be implemented in hydraulic concretes. It was found that worldwide, the pineapple leaf presents better mechanical properties than the rest of the natural fibers studied, with an average tensile strength of 1020 MPa, a modulus of elasticity of 58 GPa and an average elongation of 0.9 %. In Colombia, moriche and guérregue fibers compete with commercial man-made fibers, with average tensile strength values of 585.03 MPa and 249.11 MPa respectively, average modulus of elasticity of 9.53 GPa and 5.85 GPa respectively and elongation of 40.57 % and 36.29 % respectively. Finally, in the Caribbean region, the use of arrow cane fiber could be efficient when implemented in hydraulic concretes, since it presents interesting values, an average tensile strength of 168.23 MPa, an average modulus of elasticity of 3.53 GPa and an average elongation of 43.17 %. It is important to highlight that in Colombia there is pineapple production, so it is recommended that research be carried out regarding pineapple leaf fibers.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los materiales más utilizados en la construcción es el hormigón, con una tasa de consumo anual global de aproximadamente de 25 gigatoneladas (Gt), (Petek Gursel et al., 2014).

La mayoría de sus aplicaciones se realizan al aire libre, en elementos estructurales como vigas, columnas, losas, etc. Unas de las preocupaciones es que debido a que esas superficies están expuestas a condiciones climáticas extremas, el agrietamiento, el desconchado y la falla de costra son defectos no estructurales más comunes. A diferencia del deterioro estructural, estos defectos son causados físicamente por variaciones de temperatura, expansión del calor y reducción de la edad, erosión por agua, congelación y descongelación. También pueden ser causadas por hinchazón higérrica o encogimiento debido a los ciclos de humedad y secado (Nasir et al., 2017; Alavi Nia et al., 2012).

Si el agrietamiento se produce por el efecto de la rápida evaporación del agua del concreto en las primeras horas después de la fundición (es decir, cuando la mezcla está en un estado plástico), este fenómeno se conoce como agrietamiento por contracción plástica. En estas condiciones, las tensiones internas de tracción, superiores a la baja resistencia a la tracción de concreto, causando un agrietamiento generalizado. Por otro lado, las grietas de contracción de secado son el resultado de pérdida de humedad después de que el concreto se ha endurecido, (Meyer et al., 2020).

Con el fin de mejorar la resistencia a la tracción del concreto minimizando la contracción plástica, uno de los métodos más eficaces consiste en el uso de fibras como refuerzo.

De hecho, el uso de fibras cortas aleatoriamente distribuida dentro de la matriz mejora su resistencia al agrietamiento y, en consecuencia, conduce a mejores prestaciones en términos de tenacidad y durabilidad. La presencia de fibras también puede aumentar la resistencia del concreto al impacto, la abrasión y la fatiga (Alavi Nia et al., 2012; Mo et al., 2014; Li et al., 2021; De et al., 2011; Thiruchitrabalam et al., 2009). También en el campo de los morteros a base de cemento, el uso de diferentes tipos de fibras es ampliamente aceptado para minimizar el agrietamiento por contracción plástica (Di Bella et al., 2014). Las fibras comúnmente utilizadas para estos fines son las poliméricas o sintéticas, por ejemplo, a base de polipropileno, poliamida y poliacrilonitrilo (Izaguirre et al., 2011). En particular, las fibras de polipropileno representan el aditivo ideal para

las mezclas de hormigón con el fin de reducir la contracción plástica, agrietamiento y mejora de las propiedades superficiales del hormigón. Las mejoras se atribuyen al mecanismo de puenteo de fisuras donde la propagación de la fisura está bloqueada por la presencia de fibras de acero. Aparte de las fibras de acero, hay cada vez más aplicaciones de fibras sintéticas como polipropileno (PP) y fibras de nailon en hormigón y se descubrió que estas fibras mejoran la resistencia al impacto del hormigón (Mo et al., 2014).

Ahora, estamos viendo un movimiento creciente que se aleja de las fibras de base petroquímica y regresa a las fibras naturales, porque su efecto positivo en la ecología ha sido probado a través de muchas evaluaciones de desempeño ambiental y evaluaciones del ciclo de vida (Sen & Jagannatha Reddy, 2014).

En las últimas décadas, el desarrollo de un nuevo tipo de hormigón como material de construcción ha revivido (Altalabani et al., 2020). Existe una audiencia diversa de tomadores de decisiones y fabricantes que están interesados en comprender y reducir el impacto ambiental del hormigón y otros materiales de construcción (Petek Gursel et al., 2014).

Esta necesidad de nuevos materiales ecológicos ha llevado a la utilización de compuestos hechos de fibras naturales crudas y este ha sido uno de los temas de investigación más importante de los últimos tiempos, (Sanjay et al., 2018) (Long et al., 2015).

El consumo de energía y las preocupaciones ambientales son los principales problemas del siglo XXI y los esfuerzos de la comunidad de investigadores están en curso para conservar energía y recursos: especialmente en el sector de la construcción, mediante el uso de materiales reciclados y refuerzo de fibra orgánica/inorgánica, (Asim et al., 2020). Las matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales han atraído la atención de la comunidad investigadora, porque muestran ser una solución alternativa a las fuentes de petróleo cada vez más agotadas, (Saba et al., 2015).

Las fibras naturales son un recurso renovable y tienen varias ventajas asociadas con ellas, tales como, impartir al compuesto una alta rigidez y resistencia específicas, una relación de aspecto de fibra deseable, biodegradabilidad, disponibilidad de fuentes naturales y, tienen un bajo costo por unidad de volumen base. Estas fibras naturales tienen muchas características importantes, menor densidad, mayor resistencia específica, degradabilidad biológica, neutralidad de CO₂,

renovabilidad, buenas propiedades mecánicas, no toxicidad y pueden ser fácilmente modificadas por un agente químico, (Sen & Jagannatha Reddy, 2014).

El uso de fibras naturales, como las de yute que no se fabrican artificialmente con fósiles y energía, se consideran para reemplazar las fibras de carbono/vidrio como refuerzo en compuestos poliméricos reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés) para aplicaciones de ingeniería debido a una creciente preocupación ambiental y el requisito de desarrollar y utilizar materiales sostenibles en la construcción. Por lo tanto, el uso de estas fibras tejidas de base biológica en compuestos de FRP para reacondicionamiento de concreto es otro paso para lograr prácticas constructivas sostenibles (Sen & Jagannatha Reddy, 2014; Hota & Liang, 2011; Sen & Paul, 2015; La Mantia & Morreale, 2011; Zhang & Wang, 2016).

Según MinAmbiente (2016), Colombia es el segundo país con más biodiversidad del planeta. En la región caribe se cuenta con varios tipos de plantas con capacidad de general material fibrosos. Sin embargo, la escasa información sobre las propiedades y características mecánicas de los subproductos (fibras, residuos vegetales), hace que aún no sean una posible alternativa para uso en concretos hidráulicos.

En esta monografía se presenta una revisión bibliográfica de las características físico-mecánicas de las fibras naturales más comunes de todo el mundo, Colombia y específicamente de su región caribe, para hallar su potencial como refuerzo en los concretos hidráulicos en base a las características mecánicas de las fibras consultadas.

La realización de este trabajo es muy importante porque en base a los resultados obtenidos se podrían identificar un tipo de fibra natural con capacidades mecánicas iguales o mejores a las de las fibras sintéticas ya establecidas actualmente en el mercado a nivel mundial, nacional y local, por lo cual, se realiza una investigación, comparación e identificación de diferentes fibras naturales. Con esto se logra un gran avance en la ingeniería ya que se estarían dando soluciones desde el punto de vista social, económico, ambiental y técnico. La realización de esta monografía está precisamente relacionada con la línea de investigación de Materiales, que hace parte del grupo de investigación: “Geotecnia, Materiales, Vías y Transporte” (GEOMAVIT). Esta monografía contribuye un aporte a los temas de investigación explorados por el grupo GEOMAVIT y abre puertas a nuevas consultas e investigaciones.

2. DESARROLLO DE LA MONOGRAFÍA

2.1. FIBRAS COMERCIALES IMPLEMENTADAS EN EL CONCRETO HIDRÁULICO

Cuando hablamos de fibras para usos en concretos hidráulicos, hacemos referencia a un tipo de material con características específicas capaz de absorber los diferentes esfuerzos mecánicos presentados en el concreto hidráulico durante su etapa de fraguado, petrificación y de absorber los esfuerzos mecánicos producidos por la aplicación de diferentes cargas externas durante la vida útil de los elementos formados por este material.

En este capítulo definiremos los distintos tipos de fibras que se implementan en el concreto hidráulico, como lo son las fibras metálicas, fibras de vidrio (clase A, clase E, clase S₂, clase A, clase D, clase R, clase EGR, clase AR, entre otras), fibras sintéticas (acrílica, aramida, carbono, nailon, poliéster, polipropileno), y fibras naturales (hoja de piña (*Ananas comosus*), linaza (*Linum usitatissimum*), abacá (*Musa textiles*), ortiga (*Urtica*), cáñamo (*Cannabis sativa L.*), plátano (*Musa paradisiaca*), curauá (*Ananas Acutifolius*), yute (*Corchorus capsularis*), ramio (*Boehmeria nivea*), kenaf (*Hibiscus cannabinus*), sisal (*Agave sisalana*), henequén (*Agave fourcroydes*), cañaheja (*Ferula communis*), bambú, algodón (*Gossypium hirsutum*), alfa (*Stipa tennacissima L.*), fique, bagazo, palmira (*Borassus flabellifer L.*), corteza pecíolo, coco (*Cocos nucifera*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*), piasava (*Attalea funifera*), agave (*Agave americana L.*) espata), entre otras.

Yahaghi et al. (2016) evaluaron el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno en el cual resalto la ventaja de mejorar la resistencia al impacto y preservar la integridad estructural del hormigón funcionando así, como un armazón estructural por el cual las fibras logran un puente de conexión para disuadir la proliferación de grietas.

Raamesh et al. (2020) en su estudio concluyeron que la inclusión al 0.5% de la fibra de basalto en el concreto mejora la fuerza y la resistencia al agrietamiento del hormigón. Así mismo diferentes estudios acerca de la incorporación de fibras en concretos expuestos a cargas cíclicas (Boulekbache et al., 2016; Vicente et al., 2019), explosiones (Colombo et al., 2016; Drdlová et al., 2015), choques balísticos (Almusallam et al., 2013), y otros tipos de impactos (Yoo & Banthia, 2019; Lee et al.,

2018) evidencian que la inclusión de determinados tipos de fibras aumentan la capacidad de absorción de energía y por ende la tenacidad de los hormigones convirtiéndolos en un material más dúctil y resistentes.

A continuación, se reportan algunas de las investigaciones que se han realizado en la Universidad de Cartagena sobre fibras comerciales implementadas en materiales de construcción.

Perez & Salas (2018) implementaron fibras metálicas y usaron agregados pétreos extraídos en la zona, para estudiar el comportamiento y resistencia a tracción de materiales compuestos, y lo compararon con el concreto hidráulico, para valorar la potencialidad de éste compuesto reforzado con fibras metálicas y aplicar en pavimentos de la ciudad de Cartagena. Concluyeron que las fibras metálicas aumentaron las resistencias a tracción del concreto reforzado con fibras metálicas y agregados pétreos.

Acuña Caro (2018) comparó y analizó diferentes resistencias a compresión, obtenidas en ensayos de laboratorio, en muros de mampostería reforzados con fibra de carbono y basalto para mecanismos de restauración y conservación en la ciudad de Cartagena, y concluyeron que los muros presentan un mayor aumento de resistencias reforzados con basalto.

A continuación, se muestran los numerosos beneficios aportados al hormigón la incorporación de distintos tipos de fibras:

Segregación del concreto

La segregación en el concreto es la distribución de sus componentes de una forma no homogénea, lo que traería claras repercusiones a las propiedades mecánicas y en la durabilidad del concreto, (Benito et al., 2015). La presencia de fibras ayuda a que los componentes de la mezcla no se asiente creando mayores enlaces entre los agregados presentes en la matriz del concreto, de igual manera sirve de auxilio en el control de la exudación del concreto, (Gull & Tantray, 2020).

Fisuración

Los estudios han indicado una mejora en el rendimiento estructural y la resistencia al agrietamiento del hormigón utilizando varios tipos de fibras. El proceso de prevención y control de la propagación de micro y macro fisuras en el hormigón reforzado con fibra se atribuyen al mecanismo de puenteo de fisuras donde la propagación de la fisura está bloqueada por la presencia de fibras, (Borhan et al., 2020).

Resistencia al impacto

La resistencia al impacto es la capacidad de absorción de energía antes de llegar al agrietamiento inducidos por cargas de choque, (Instron, 2020). La energía consumida durante la carga de impacto se utiliza para el proceso de desarrollo de grietas y su propagación en el hormigón, (Naraganti et al., 2019). La adición de fibras ayuda al hormigón a mejorar su resistencia frente a cargas de impactos, (Yew et al., 2011).

Resistencia a la abrasión

El uso de fibras proporciona una reducción en el desgaste abrasivo del hormigón el cual se ve afectado por el uso de materiales cementantes suplementales, relación agua/cemento, tipo de cemento, condiciones ambientales y tiempo de curado, (Grdic et al., 2012).

Comportamiento del concreto con relación al fuego

Las fibras ayudan a que no se propaguen las grietas en el concreto ya que este a ser expuesto a altas temperatura se vuelve quebradizo, pierde su densidad y resistencia, (Mezzal et al., 2021; Netinger Grubeša et al., 2018).

2.1.1. Tipos de fibra según su funcionalidad y geometría

La susceptibilidad del hormigón a la propagación de las micro y macro grietas así como sus requerimientos a determinadas resistencias (abrasión, impacto y agrietamiento) ha dado lugar al uso de diferentes tipos de fibras (Gull & Tantray, 2020), las cuales se definen en dos categorías: las de bajo y las de alto módulo de elasticidad (Mendoza et al., 2011). El éxito en la funcionalidad de cada una de las fibras depende de varios factores como su origen, longitud, diámetro, dispersión dentro de la matriz, forma, material, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, (Karihaloo & Ghanbari, 2012; Borhan et al., 2020).

A continuación se describen los dos tipos de fibras, las cuales se diferencian en su funcionalidad, geometría y dosificación.

2.1.1.1. Microfibras.

La función de las microfibras es la de prevenir la fisuración por retracción plástica en el concreto. Estas fibras suelen presentar un módulo de elasticidad entre 1 GPa a 1,5 GPa, (Andrade, 2020). Estas presentan diámetros de entre 0,023 mm y 0,050 mm. Su dosificaciones en el concreto se encuentra entre 0,3 kg/m³ a 1,2 kg/m³ de concreto, (Ortega Sua & Ariza Roncancio, 2018) .

2.1.1.2. Macrofibras.

Las fibras actúan como una malla electrosoldada y varillas de refuerzo, aumentando la tenacidad del concreto y agregando al hormigón capacidad de carga después del agrietamiento. Estas fibras suelen ser de metal o de material sintético las cuales presentan un diámetro entre 0,05 mm y 2,00 mm. Presentan una relación de aspecto longitud-diámetro (L_c/d_f) entre 20 a 100 y su dosificación en el concreto se encuentra 0,2 % y 0,8 % del volumen del mismo, (Bolot et al., 2014; Ortega Sua & Ariza Roncancio, 2018).

2.1.2. Clasificación de las fibras según su material

2.1.2.1. Fibras de acero.

Las fibras de acero son materiales que presentan una relación de longitud-diámetro (L_c / d_f) de entre 20 a 100 y contienen gran variedad de secciones transversales y perfiles. Estas pueden ser de acero inoxidable o acero al carbono, y pueden encontrarse en el mercado con revestimientos de zinc o un poco menos costosas como las galvanizadas, aparte de que presentan resistencia a la corrosión (Cordoba et al., 2013). Las fibras de acero pueden ser de diferentes tamaños, formas y rugosidades, todo dependiendo del proceso de fabricación., (Kosmatka, Steven H.; Wilson, 2011).

Se utilizan, normalmente, en pavimentos de aeropuertos, revestimientos de pistas, pisos industriales, estabilidad de taludes rocosos y revestimientos de túneles. Igualmente se aplican en elementos de concretos prefabricados mejorando su resistencia al impacto.

2.1.2.1.1. Propiedades físico-mecánicas.

Las fibras metálicas tienen propiedades físicas y mecánicas muy interesantes, por tanto son muy populares en el mercado. La densidad es de $7,8 \text{ g/cm}^3$, el diámetro de 100-1000 μm , presentan un módulo de elasticidad de 210 MPa, una resistencia a la tracción de entre 500-2600 MPa, y una elongación de 0,5-3,5 % (Kosmatka, Steven H.; Wilson, 2011).

2.1.2.2. Fibras de vidrio.

Las fibras de vidrio son materiales compuestos que consisten en fibras continuas o discontinuas de vidrio de baja densidad inmersas en una matriz plástica. Las fibras de vidrio se utilizan en el concreto para mejorar características como su capacidad a tensión y ductilidad y disminuir la fisuración por retracción, (Cordoba et al., 2013).

Las fibras de vidrio tienen excelentes propiedades como alta resistencia, flexibilidad, rigidez y resistencia al daño químico. Cada tipo de fibra de vidrio tiene propiedades únicas y se utiliza para diversas aplicaciones en forma de compuestos poliméricos, (Sathishkumar et al., 2014).

2.1.2.2.1. *Propiedades físico-mecánicas.*

En la

Tabla 1 se pueden observar diferentes tipos de fibras de vidrio, la cual cada una tiene diferentes características y usos, la fibra clase E posee mayor resistencia y resistividad eléctrica, la fibra clase C posee mayor resistencia a la corrosión, la fibra clase S₂ contiene alta resistencia, módulo y estabilidad, la fibra A mayor durabilidad, resistencia y resistividad eléctrica, la fibra D contiene una constante dieléctrica baja, la fibra R posee mayor fuerza y resistencia a la corrosión ácida, la fibra AR es resistente a los álcalis, (Sathishkumar et al., 2014).

Las fibras que comúnmente son utilizadas para reforzar el concreto son la fibra de vidrio tipo E y tipo AR, (Cordoba et al., 2013).

Tabla 1. *Propiedades físicas y mecánicas de fibras de vidrio.*

Propiedades Fibra	Densidad (g/cm ³)	Fuerza de Tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Referencia
Clase E	2,58	3445	72,3	4,8	(Sathishkumar et al., 2014)
Clase C	2,52	3310	68,9	4,8	
Clase S ₂	2,46	4890	86,9	5,7	
Clase A	2,44	3310	68,9	4,8	
Clase D	2,11-2,14	2415	51,7	4,6	
Clase R	2,54	4135	85,5	4,8	
Clase EGR	2,72	3445	80,3	4,8	
Clase AR	2,70	3241	73,1	4,4	

2.1.2.3. Fibras sintéticas.

Las fibras sintéticas son aquellas fibras hechas por el hombre, desarrolladas y procesadas durante investigaciones en industrias petroquímicas y textiles. Estas fibras tienen secciones discretas y se distribuyen aleatoriamente en el concreto. Los tipos de fibras sintéticas que se implementan en el concreto son: polipropileno, poliéster, polietileno, nailon, carbono, acrílico y aramida (Cordoba et al., 2013).

La función de las fibras sintéticas en el concreto es la de reducir la retracción plástica y el agrietamiento por subsistencia y pueden ayudar a fortalecer el concreto después de que se agrieta (KOSMATKA, Steven H.; WILSON, 2011).

2.1.2.3.1. Propiedades físico-mecánicas.

Las fibras sintéticas tienen gran variedad de aplicaciones debido a las propiedades mecánicas de cada una de estas fibras. En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas y mecánicas de cada fibra sintética referenciada.

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de fibras sintéticas.

Propiedades Fibra	Densidad (g/cm ³)	Diámetro (μm)	Fuerza de Tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Referencia
Acrílica	1,18	5-17	200-1000	17-19	28-50	(Kosmatka, Steven H.; Wilson, 2011)
Aramida	1,44	10-12	2000-3100	62-120	2-3,5	
Carbono	1,90	8-9	1800-2600	230-280	0,5-1,5	
Nailon	1.14	23	1000	5,2	20	
Poliéster	1,38	10-80	280-1200	10-18	10-50	
Polietileno	0,96	25-1000	80-600	5	12-100	
Polipropileno	0,90	20-200	450-700	3,5-5,2	6-15	

2.1.2.4. Fibras naturales.

Las fibras naturales son materiales celulósicos de origen biológico, en la cual sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, les conceden cualidades en su aspecto, textura, longitud, resistencia y flexibilidad, que las hacen susceptibles de uso, (Rendon & Neyra, 2020).

Las fibras naturales pueden dividirse en dos categorías: fibras naturales orgánicas y fibras naturales inorgánicas, (Rousakis, 2016).

Las fibras naturales orgánicas se clasifican en plantas como:

- 1) Fibras de semillas: Algodón, Coco, Caña de aceite.
- 2) Fibra de pelo de fruta: Ceiba, Paina.
- 3) Fibra de hoja: Sisal, piña, plátano.
- 4) Fibra de tallo: Limo, Cábano, Kenaf, Yute.
- 5) Otro: Hierbas, Bambú, Pulpa de madera.

Las fibras naturales inorgánicas corresponden a fibras minerales como el amianto (Vickers et al., 2015) y las fibras de basalto, así como Silexil (agujas silíceas procedentes de espongiolita) (Saliba et al., 2005). Es importante mencionar que la fibra de amianto es cancerígena, por lo que ya no se usa en muchos países, entre los que está Colombia (prohibición descrita en la ley Ana Cecilia Niño, aprobada el 11 de junio de 2019, que prohíbe producir, usar, comercializar y exportar asbesto en Colombia).

A continuación, se elabora el siguiente esquema donde se muestra la clasificación de las fibras naturales:

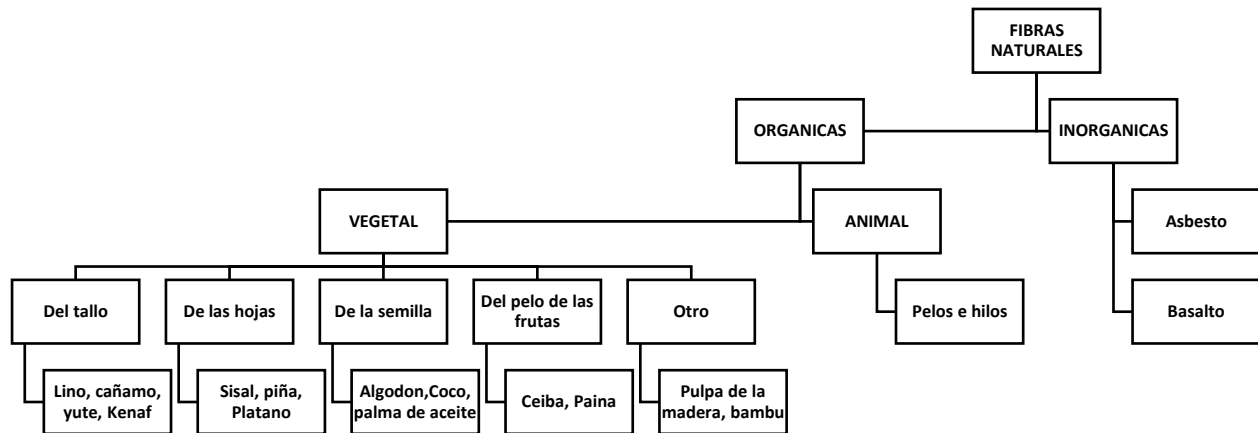


Figura 1. Visión general de las fibras naturales.

Fuente: Autores.

En términos generales, las fibras naturales pueden obtenerse de animales, plantas y minerales. En particular, las fibras vegetales se clasifican como fibras del tallo, fibras de las hojas, fibras de las semillas y otras fibras, incluidas las hierbas, las cañas, las frutas y las fibras de madera

2.1.2.4.1. Estructura fisicoquímica de las fibras vegetales.

Es fundamental conocer cada uno de los parámetros físicos y químicos de una fibra vegetal ya que su composición afectaría fuertemente sus propiedades mecánicas.

La fibra vegetal consta de una celda primaria en la periferia y tres paredes secundarias (S1, S2, y S3) en el interior y un lumen en el centro (Akil et al., 2011). La pared celular principal está formada por celulosa cristalina y redes de microfibrillas dispuestas de manera desordenada. En las paredes secundarias, las microfibrillas cristalinas de celulosa están dispuestas helicoidalmente, con la dirección principal de la fibra (Sanjay et al., 2019).

La Figura 2 presenta una configuración general de una estructura de fibra natural y su organización microestructural que cubre los tres componentes estructurales principales, es decir, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (Kabir et al., 2012).

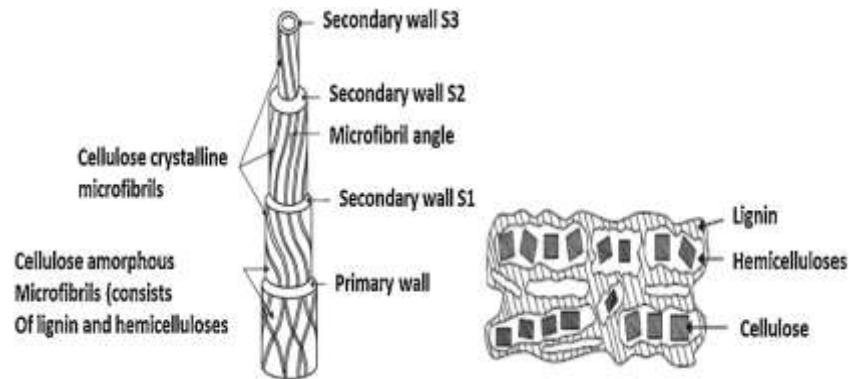


Figura 2. Estructura de la fibra natural y organización microestructural de los tres componentes principales de una fibra natural.

Fuente: Tomado de (Kabir et al., 2012).

Normalmente la pared celular primaria está en un orden del 12% del total de las paredes celulares, la pared celular secundaria hasta el 90% del total de la pared celular y el núcleo luminal hasta un 25% de la sección transversal de la fibra. El núcleo se encarga del transporte de nutrientes y la pared celular de la rigidez estructural de la planta viva, (Shah, 2013).

Las paredes celulares están compuestas por una matriz de celulosa, hemicelulosa, lignina y una larga cadena de microfibrillas que están orientadas en diferentes direcciones en cada pared celular, (Dittenber & Gangarao, 2012). La celulosa se considera el principal componente marco de la estructura de la fibra. Proporciona resistencia, rigidez y estabilidad estructural a la fibra y su contenido aumenta proporcionalmente desde las capas primarias a las capas secundarias, (Kabir et al., 2012).

La celulosa presenta regiones amorfas y cristalinas, debido a la estructura desordenada de sus moléculas esto se refleja en las propiedades mecánicas de la fibra. Por ejemplo, la rigidez a tracción de la celulosa cristalina es hasta 15 veces mayor que la de la celulosa amorfa, (Placet et al., 2012).

La cristalinidad le otorga a las fibras resistencia a la tracción, mayor densidad, resistencia al rasgado y mayor módulo de elasticidad mientras que disminuye la elongación, la absorción de agua, el hinchamiento, la absorción de colorantes, la flexibilidad y la reacción química, (Bustos, 2017). Una estructura amorfa es más reactiva y por ende más degradable, (Bustos, 2017).

La matriz celulosa está formada por microfibrillas celulósicas orientadas helicoidalmente en dirección al eje longitudinal de las fibras (Thygesen, 2006). Estas microfibras forman ángulos en relación al eje de la fibra y se cree que es responsable de una serie de propiedades mecánicas de la fibra, ya que los ángulos más pequeños generalmente conducen a mayor resistencia y rigidez y ángulos más grandes a mejor ductilidad, (John & Anandjiwala, 2008). Este ángulo varía en cada capa y la capa celular S2 por ser la más gruesa es su Angulo microfibril el que más importancia tiene (Shah, 2013; Placet et al., 2012).

Las moléculas de hemicelulosa son hidrógeno unido con fibrillas de celulosa y forman materiales de cementación para la estructura de la fibra. La lignina y la pectina se combinan con la red celulosa-hemicelulosa y proporciona una calidad adhesiva para mantener las moléculas unidas. Esta calidad adhesiva es la causa de las propiedades de resistencia y rigidez de la fibra, (Kabir et al., 2012).

Otro aspecto fundamental es la proporción del área transversal de la cavidad luminal. A menor proporción mayor será la propiedad a tracción, lo que aumentaría la longitud crítica de la fibra (L_c) y por ende mayor será su relación de aspecto (L_c/d_f) que es lo que se quiere en las fibras (Shah, 2013; C. Baley, 2002; Summerscales et al., 2010).

La Tabla 3 fue obtenida de Shah, (2013), en ella se describe la proporción típica que se presenta en una estructura de fibra vegetal (celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina), en este caso, fibra de lino.

Tabla 3. Composición fisicoquímica típica de la fibra de lino, junto con la densidad y la rigidez de tracción de los distintos componentes.

	Celulosa cristalina	Celulosa amorfa	Hemicelulosa	Lignina	Pectina
Contenido en lino seco (wt%)	30–50	20–30	14–18	2–3	2–3
Densidad (g/cm³)	1.6	1.42	1.4	1.4	-
Módulo de tracción (GPa)	74–168	8–11	7–8	2–4	-

Fuente: Tomado de (Shah, 2013)

De la Tabla 3 podemos ver como la celulosa cristalina presenta un módulo de tracción promedio de 121 GPa significativamente mayor que los 9,5 GPa presentado en la celulosa amorfa esto se debe como ya se dijo en las secciones anteriores a la estructura ordenada, compacta y enlaces intrafibril fuertes presentados en la celulosa cristalina. Se concluye que no solo debe escoger una fibra vegetal con alto contenido de celulosas, sino que esta debe presentar igualmente alto contenido cristalinidad.

De acuerdo a lo anterior se concluye que los parámetros microestructurales que definen las propiedades mecánicas de la fibra vegetal son los siguientes, (Placet et al., 2012; C. Baley, 2002; Akil et al., 2011; Shah, 2013; Gassan et al., 2001):

- a. Contenido de celulosa.
- b. Cristalinidad de celulosa.
- c. Angulo microfibril.
- d. Relación de aspecto de la fibra (L_c / d_f).
- e. Cavidad Luminal.

A continuación, en la Tabla 4 se muestra varias fibras vegetales ordenadas de acuerdo a su origen en la planta junto con sus parámetros microestructurales.

Tabla 4. Fibras naturales ordenadas de acuerdo a su origen en la planta junto a sus parámetros microestructurales.

FIBRA	C (WT%)	Cc (%)	AMF	(L_c / d_f).	PNL (%)	Fuente
Tallo						(Shah, 2013)
Lino	64–71	50–90	5–10	1750	2–11	
Cáñamo	70–74	50–90	2–6	900	2–11	
Yute	61–72	50–80	8	100	10–16	
Hoja						
Sisal	66–78	50–70	10–25	100	10–22	
Piña	70–82	44–60	10–15	450	10–22	
Plátano	44–64	45–55	10–12	150	35–53	
Semilla						
Algodón	85–93	50–90	46	1000	5	
Coco	32–43	27–33	30–49	35	30–50	
Palma de aceite	40–50	20–30	42–46	100	5–10	
Otro						
Bambú	26–60	40–60	8–11	100	–	
Fibra de madera	40–60	60–70	10–25	50	20–70	

C: Contenido de Celulosa, Cc: Cristalinidad en la celulosa, AMF: Angulo microfibril, Relación de aspecto (L_c / d_f), PNL: Porosidad Luminal.

Fuente: Tomado de Shah, (2013)

Se deduce de igual manera que las propiedades de las fibras varían dependiendo de la parte de la planta de donde son extraídas. De acuerdo a (Santulli, 2019), las fibras del tallo de la planta exhiben alta resistencia (hasta 700 MPa) y rigidez (hasta 70 GPa), las fibras de las hojas tienden a mostrar fuerza moderada a alta (300-700 MPa) y rigidez más baja (10-30 GPa) y fibras de semillas se caracterizan por la menor combinación de fuerza (100-500 MPa) y rigidez (hasta 15 GPa).

2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS FIBRAS NATURALES MÁS COMUNES A NIVEL MUNDIAL

En la Tabla 5 se presentan los valores de resistencia a tracción, módulo elástico, y deformación de las fibras naturales investigadas y analizadas, las cuales están organizadas en orden descendente debido a la gran importancia de este parámetro en el diseño e implementación de fibras naturales en concretos hidráulicos, teniendo la hoja de piña el valor más de resistencia a la tracción.

Tabla 5. Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales de origen vegetal más estudiadas a nivel mundial.

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Longitud (mm)	Diámetro (µm)	Fuerza de Tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo específico (aprox)	Alargamiento a la rotura (%)	Referencia
Hoja de piña	1,4	10	20-80	413-1627	34-82	-	0,8-1	(Indran & Raj, 2015)
Linaza	1,38	-	14,1-19,5	745-1145	43,9-61,1	-	1,62-2,52	(Christophe Baley & Bourmaud, 2014)
Abacá	1,5	-	-	400-980	6,2-20	9	1-10	(Dittenber & Gangarao, 2012)
Ortiga	-	-	-	650	38	-	1,7	(Ho et al., 2012)
Cáñamo	1,07	-	42	389-900	35	22	1,6	(Placet, 2009)
Plátano	1,35	150	50-250	529-759	17,85	-	1-3,5	(Indran & Raj, 2015)
Curauá	1,4	35	7-10	87-1150	11,8-96	39	1,3-4,9	(Yan et al., 2014)
Yute	1,46	-	40-350	393-800	10-30	6,85-20,6	1,5-1,8	(Omrani et al., 2016)
Ramio	1,5	-	50	220-938	44-128	-	2-3	(Indran & Raj, 2015)
Kenaf	1,4	-	-	223-930	14,5-53	24	1,5-2,7	(Dittenber & Gangarao, 2012)
Sisal	1,33-1,5	900	8-200	363-700	9-38	17	2-7	(Yan et al., 2014)
Henequén	1,2	-	-	430-570	10,1-16,3	11	3,7-5,9	(Yan et al., 2014)
Cañaheja	1,24	-	-	475	52,7	-	4,2	(Fiore et al., 2014)
Bambú	0,6-1,1	1,5-4	25-40	140-800	11-32	25	2,5-3,7	(Dittenber & Gangarao, 2012)
Algodón	1,5-1,6	-	-	287-597	5,5-12,6	-	7-8	(Ho et al., 2012)
Alfa	0,89	100	-	350	22	-	5,8	(Indran & Raj, 2015)
Fique	0,72	-	160-420	43-571	8,2-9,1	-	9,8	(Muñoz et al., 2014)
Bagazo	1,25	10-300	10-34	222-290	17-27,1	18	1,1	(Dittenber & Gangarao, 2012)
Palmira	1,09	40	70-1300	180-215	7-60	-	7-15	(Indran & Raj, 2015)

Corteza de peciolo	0,69	-	250-650	185	15	-	2,1	(Sathishkumar et al., 2012)
Coco	1,15	-	100-460	108-252	4-6	-	15-40	(Sathishkumar et al., 2012)
Palma de aceite	0,7-1,55	-	150-500	80-248	0,5-3,2	2	17-25	(Dittenber & Gangarao, 2012)
Piasava	1,4	-	-	134-143	1,07-4,59	2	7,8-21,9	(Dittenber & Gangarao, 2012)
Agave	-	40	171-307	66-198	0,89-2,77	-	19,74-46,84	(Bezazi et al., 2014)
Espata	0,69	-	150-400	75,6	3,1	-	6	(Sathishkumar et al., 2012)

Cabe resaltar que las propiedades de algunas fibras están presentadas en intervalos debido a las diferentes pruebas realizadas que arrojaron distintos resultados comprendidos en tales intervalos. Esto se debe a la variación de propiedades físicas (diámetro, longitud, densidad, entre otras) y composiciones químicas (celulosa, hemicelulosa y lignina) de las diferentes fibras naturales.

2.2.1. Comparación físico-mecánica de fibras naturales

En la Figura 3 podemos observar que las fibras naturales con más altos valores de resistencia a la tracción son: la hoja de piña (413-1627 MPa), linaza (745-1145 MPa), abacá (400-980 MPa), ortiga (650 MPa), cáñamo (389-900 MPa), plátano (529-759 MPa), curauá (87-1150 MPa), yute (393-800 MPa), ramio (220-938 MPa), kenaf (223-930 MPa), entre otras.

Se puede observar que algunas fibras como la hoja de piña, curauá, bambú, entre otras, presentan valores de desviación estándar altos comparados con las fibras de espata, piasava, palmira, corteza de peciolo, entre otras. Esta variación se debe a los diferentes ensayos realizados a las fibras naturales por diferentes autores.

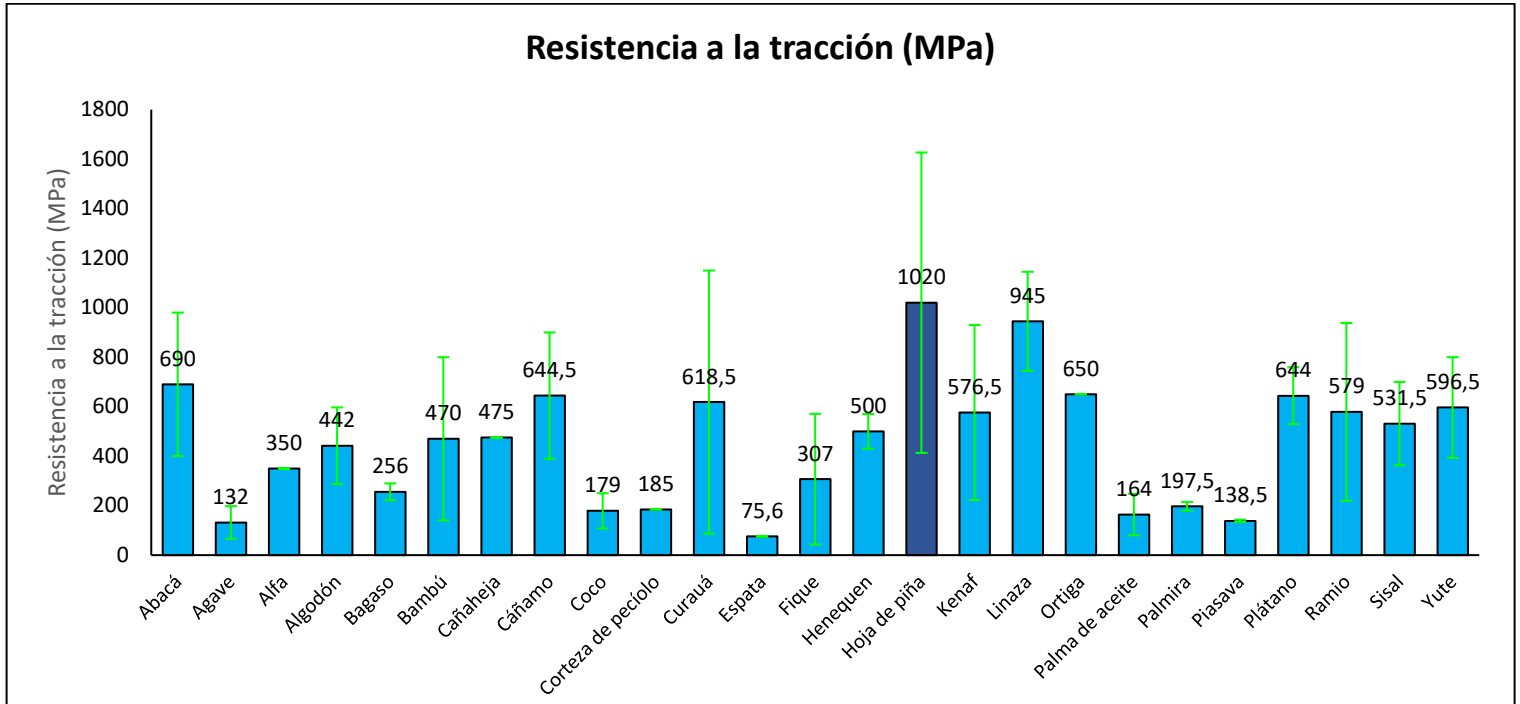


Figura 3. Esfuerzo a tensión de fibras naturales.

Fuente: Autores.

En la Figura 4 se pueden evidenciar las fibras naturales con mayores valores de módulo elástico son: ramio (44-128 GPa), hoja de piña (34-82 GPa), curauá (11,8-96 GPa), férula (52,7 GPa), linaza (43,9-61,1 GPa), cañamo (35 GPa), kenaf (14,5-53 GPa), palmira (7-60 GPa), sisal (9-38 GPa), bagazo (11-27,1 GPa), entre otras. Se puede observar que la fibra más rígida es el ramio, paralelamente, la fibra más elástica es la espata. El módulo de elasticidad es un factor de gran importancia, ya que define el comportamiento del material, en este caso la fibra natural. Mientras más grande sea el módulo de elasticidad, más rígido es el material.

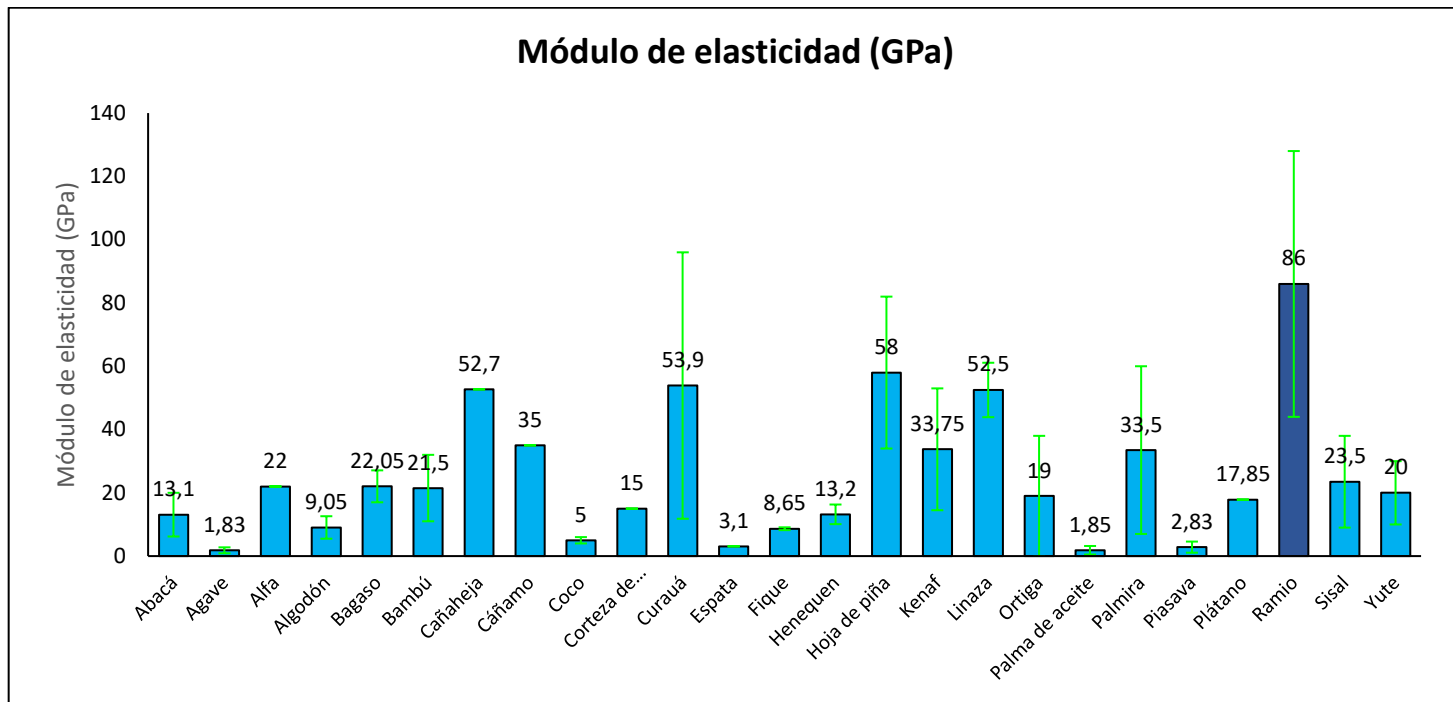


Figura 4. *Módulo de elasticidad de fibras naturales.*

Fuente: Autores.

En la Figura 5 se puede notar que las fibras naturales con porcentajes más altos de deformación son: agave (19,74-46,84 %), coco (15-40 %), palma de aceite (17-25 %), piasava (7,8-21,9 %), palmira (7-15 %), figue (9,8 %), algodón (7-8 %), espata (6 %), alfa (5,8 %), abacá (1-10 %), entre otras.

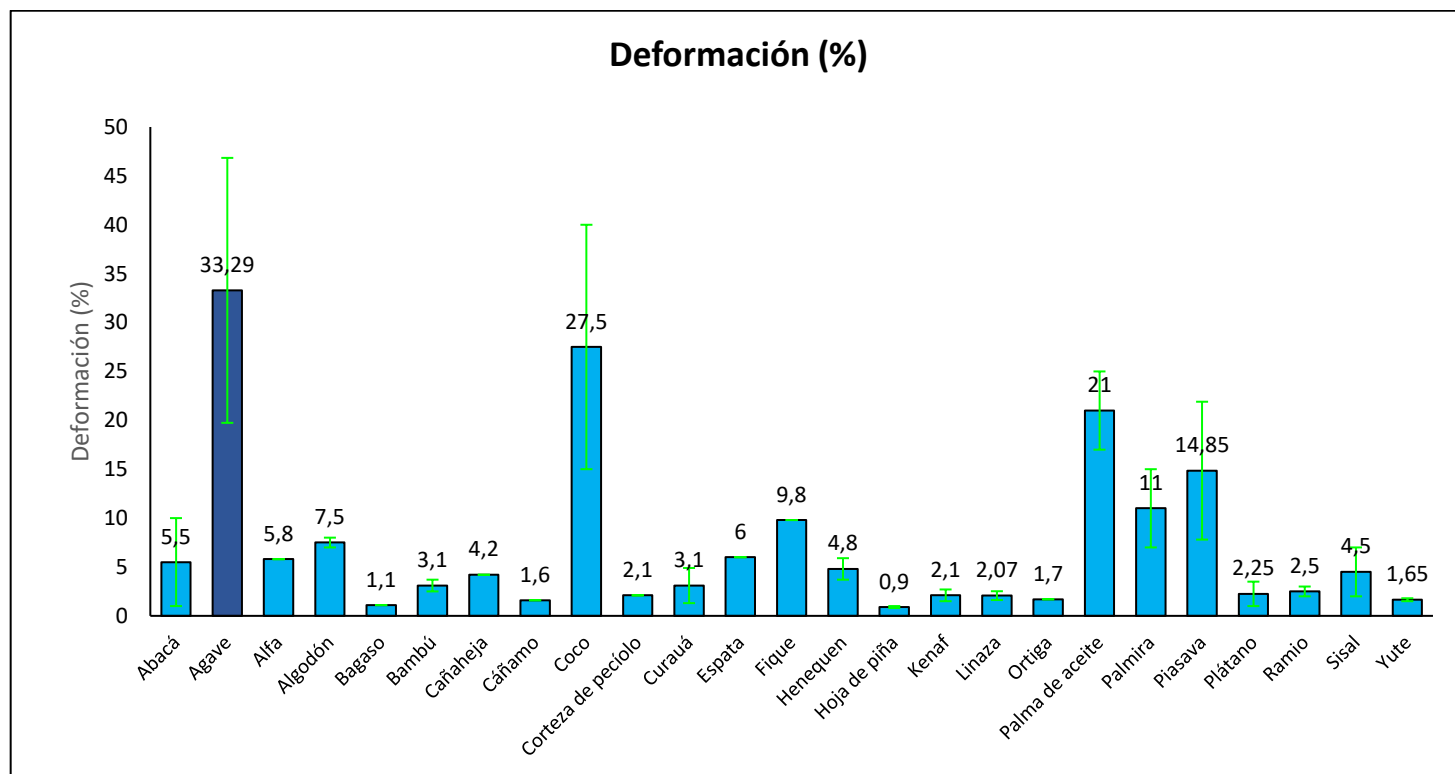


Figura 5. Deformación de fibras naturales.

Fuente: Autores.

La deformación máxima promedio la presenta el agave con 33,29 % siendo la fibra más flexible y la deformación promedio mínima la presenta la hoja de piña con 0,9%, siendo la fibra más rígida de las evaluadas.

2.3. FIBRAS NATURALES COLOMBIANAS CON POTENCIAL PARA SER USADAS EN EL CONCRETO HIDRAULICO.

Colombia tiene el 0,7 % de la superficie continental mundial y el 10 % de la biodiversidad del mundo, lo que representa entre 45.000 y 55.000 especies de plantas, cifras muy similares a las de Brasil, que cuenta con 55.000, (Mora, 2017). Como fue mencionado anteriormente, según MinAmbiente (2016), Colombia es el segundo país con más biodiversidad del planeta. En la región caribe se cuenta con varios tipos de plantas con capacidad de general material fibrosos. La escasa información sobre sus morfología, características y propiedades físicas y mecánicas de los subproductos (fibras, residuos vegetales), hace que aún no sean una posible alternativa para uso en concretos hidráulicos. Esta escasa información hace que el uso de las fibras se encuentre más que todo en la artesanía, ya que no están expuestas a grandes esfuerzos mecánicos. Un ejemplo de esto son los sombreros, tapetes, canastos, confección de bolsos, entre otros.

En los últimos años ha venido creciendo un interés en el estudio de fibras naturales para compuestos de matrices poliméricas en Colombia, como muestra tenemos los estudios hechos por Gómez (2017), quien estudió el efecto de las adiciones de fibras de coco en las propiedades físico-mecánicas del mortero. De igual manera tenemos los estudios hechos por (Cuellar & Muñoz, 2010; Estrada Mejía, 2009), quienes caracterizaron mecánicamente y estudiaron el efecto de la fibra de bambú en una matriz polimérica, mostrando como resultado el aumento de la resistencia al impacto y la compresión del compuesto. S. Gómez et al. (2017) se centraron en el estudio de la fibra Esparto, extraída de la planta de Esparto (*Juncus ramboi subsp. colombianus*) autóctona del departamento de Boyacá, Colombia, mostrando que esta fibra es una alternativa viable para ser usada en matrices poliméricas. Suárez Castañeda et al. (2017) realizó una búsqueda local de fibras vegetales dentro del área metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia con el fin de estudiar sus características físicas y morfológicas, y sus comportamientos mecánicos después de aplicar varios tratamientos químicos, encontraron y seleccionaron tejidos de fique, yute, corteza de coco, lino y algodón . Mora (2017) realizó una caracterización mecánica de varias fibras vegetales procedentes de varias regiones de Colombia y aunque su estudio está enfocado a la utilización de las fibras en la industria automotriz, las características mecánicas de las fibras estudiadas son comparables a las fibras utilizadas como refuerzo en los concretos hidráulicos. Siendo así estas fibras naturales

una alternativa válida a las fibras sintéticas que actualmente se encuentran en el mercado como coadyuvante para prevenir la fisuración por retracción plástica u otros efectos inducidos por los distintos comportamientos mecánicos presentados en la matriz del concreto.

La Tabla 8 muestra las fibras naturales a estudiar obtenidas de Mora (2017). La tabla muestra las fibras naturales que hasta ahora han estudiado en Colombia y se usan en la artesanía, evitando involucrar en la investigación todo el proceso de extracción, desfibrado, cocción y secado para obtener las fibras a estudiar (Mora Espinosa, 2017).

En este capítulo haremos una comparación entre fibras naturales presentes en Colombia y las fibras que actualmente se utilizan para prevenir el agrietamiento por retracción plástica en el concreto.

En Colombia existen varios proveedores de fibras para usos en el concreto hidráulico teniendo el polipropileno como el principal material entre las fibras consultadas. A continuación, se muestra el siguiente cuadro con las fibras que actualmente están presente en el mercado colombiano para usos en el concreto hidráulico.

Tabla 6. Fibras presentes en el mercado colombiano.

NOMBRE	MATERIAL	APLICACIÓN EN EL CONCRETO HIDRAULICO
FIBRA A	Acero	Ayuda a reducir las grietas por retracción plástica, aumenta la ductilidad, tenacidad y resistencia al impacto. Extremos conformados para obtener máximo anclaje en el concreto.
FIBRA B	Polipropileno modificado	Reduce las grietas por retracción plástica, reduce la fragilidad en el concreto mejorando la resistencia al impacto y mejora la resistencia al fuego en concretos lanzados y como convencionales.
FIBRA C	Polipropileno modificado	Reduce las grietas por retracción plástica, reduce la fragilidad en el concreto mejorando la resistencia al impacto, evita el desprendimiento del concreto y mejora la resistencia al fuego en concretos lanzados y como convencionales.
FIBRA D	Poliiolefina	Proporciona una mejor cohesión del concreto fresco. Disipa las tensiones en el hormigón y evita el agrietamiento estructural. Capacidad de puenteo de grietas.

		Mayor resistencia a la flexión y al corte. Mejora la capacidad de carga y la ductilidad. Aumenta la resistencia a la abrasión. Aumenta la resistencia al ataque de congelación y descongelación
FIBRA E	Polímero de alto desempeño y Polipropileno virgen.	Incrementa la tenacidad del concreto, mejora su resistencia al impacto, reduce las grietas tanto en el estado fresco como endurecido, aumenta la resistencia residual y la ductilidad. Mejora la durabilidad del concreto reforzado, Reduce rebote en el concreto lanzado. Máxima resistencia al arrancamiento dentro de la matriz del concreto. Resistencia química a álcalis.
FIBRA F	Polipropileno, polietileno.	Previene la exudación y la segregación. Da un control tridimensional de la retracción plástica previniendo las grietas por retracción. Excelente dispersión en concreto. -Reduce el rebote del concreto lanzado.

Fuente: Autores en base a la información suministrada por los proveedores de fibras en Colombia.

De igual manera se presenta en la Tabla 7 las propiedades físico-mecánicas de las fibras descritas anteriormente:

Tabla 7. Propiedades físico-mecánicas de las fibras presentes en el mercado para usos en concretos hidráulicos.

Fibra	Material	Densidad Kg/cm ³	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación (%)
Fibra A	Acero	0,0091	35	0,54	1200	200	4
Fibra B	Polipropileno modificado	0,0091	19		29,42-44,13	1,5	20-30
Fibra C	Polipropileno modificado	0,0093	6		29,42-44,13	1,5	20-30
Fibra D	Poliiolefina	0,0091	60	0,84	550	8,5	-
Fibra E	Polipropileno virgen y polímero de alto desempeño	0,001	55		360	4,8	-
Fibra F	Polipropileno, polietileno.	0,00092	74		600-650	9,5	-

Fuente: Autores en base a la información suministrada por los proveedores de fibras en Colombia.

2.3.1. Comparación físico-mecánica de fibras naturales colombianas

En la Tabla 8 se presentan las fibras objeto de estudio junto a sus propiedades mecánicas y la ubicación de donde fueron extraídas en el territorio colombiano:

Tabla 8. Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales colombianas.

Fibra	Longitud (mm)	Diámetro (μm)	Fuerza de Tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Referencia
Cabecinegro	20	-	9,9-25,5	0,59-1,99	12,99-17,79	(Mora Espinosa, 2017)
Cañaflecha	20	-	108,43-228,03	1,93-5,13	25,47-60,87	
Cumare	20	-	159,3-281,7	4,39-8,39	11,95-23,55	
Damagua	20	-	11,48-26,08	0,07-0,67	13,48-34,08	
Esparto	20	0,8	81,91-235,91	1,82-4,42	11,37-22,77	
Guaruma	20	-	92,48-197,08	1,23-3,63	24,24-50,24	
Iraca	20	-	61,59-140,19	4,51-10,71	5,03-15,63	
Moriche	20	-	406,63-763,43	6,73-12,33	12,97-68,17	
Palma estera	20	-	59,83-149,63	1,33-3,73	13,27-48,87	
Werregue	20	-	151,71-346,51	3,35-8,35	9,59-62,99	

De la Tabla 8 podemos observar la propiedad mecánica de las fibras objeto de estudio, empezando con la fuerza a tensión, donde el valor más alto lo obtiene la fibra de moriche con un promedio de 585,03 MPa, seguido por las fibras de werregue (249,11 MPa) y cumare (220,5 MPa). Los valores más bajos los obtuvieron la fibra de damagua con 18,78 MPa y cabecinegro con 17,7 MPa. Estos resultados se grafican en la Figura 6.

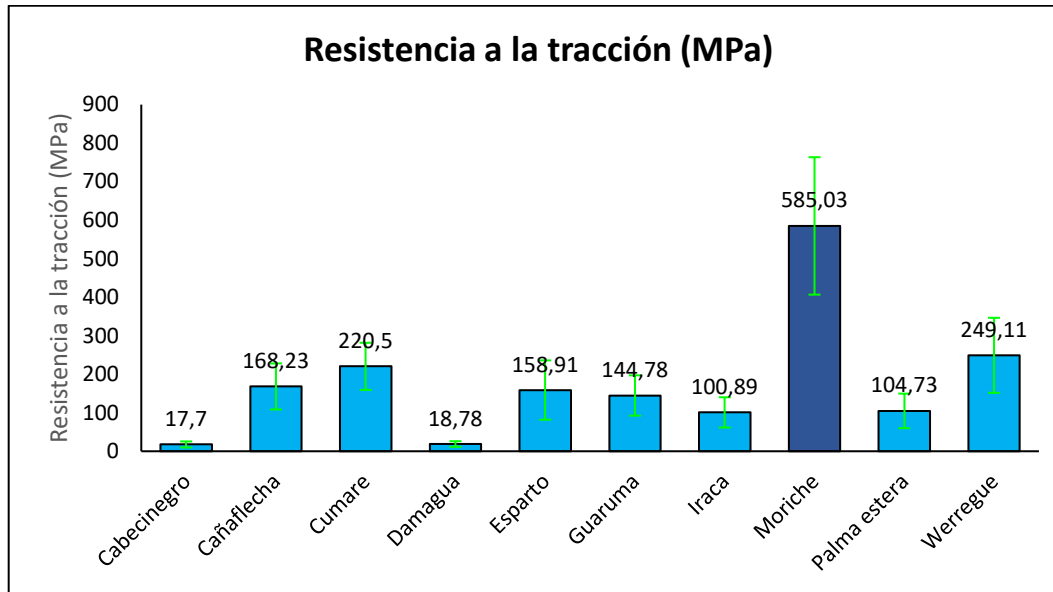


Figura 6. Resistencia a la tracción de fibras naturales colombianas.

Fuente: Autores.

Las resistencias obtenidas se pueden clasificar en cuatro grupos, uno inicial de resistencia muy baja donde están la fibra de damagua y la fibra de cabecinegro, luego una zona de resistencia media donde se encuentran la fibra iraca y palma estera con valores muy cercanos entre sus resistencias, de 100,89 MPa y 104,73 MPa respectivamente; una zona de resistencia media alta para la fibra de guaruma (144,78 MPa), esparto (158,92 MPa) y cañaflecha (168,23 MPa), finalizando en una zona de resistencia alta con valores de resistencias mayores a 220 MPa, donde se encuentran las fibras de cumare (220,52 MPa), werregue (249,11 MPa) y moriche (585,04 MPa).

En la Figura 7, se puede observar la resistencia a la tracción de algunas fibras colombianas comparadas con las fibras sintéticas presentes en el mercado para usos en concretos hidráulicos.

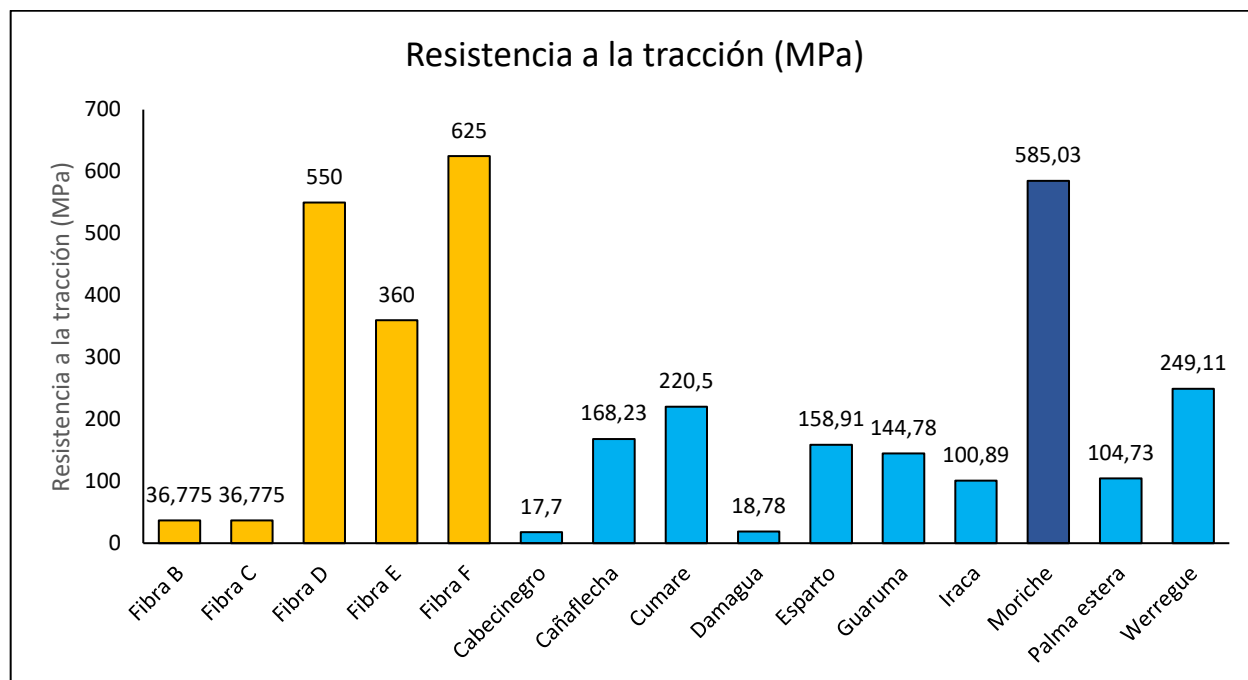


Figura 7. Comparación resistencia a la tracción entre las fibras sintéticas y las fibras naturales. Barras amarillas: fibras sintéticas, barras azules: fibras naturales colombianas.

Fuente: Autores.

De la Figura 7 se tiene que las fibras naturales colombianas (barras azules) tienen un comportamiento sobresaliente a tracción frente a las fibras sintéticas (barras amarillas) presentes en el mercado; descartando las fibras de damagua y cabecinegro por baja resistencia a tracción.

La fibra natural de palma de moriche (barra azul oscuro) posee gran potencial para reemplazar a varias fibras sintéticas en base a su resistencia a tracción.

La Figura 8 muestra los valores del módulo de elasticidad de las fibras colombianas.

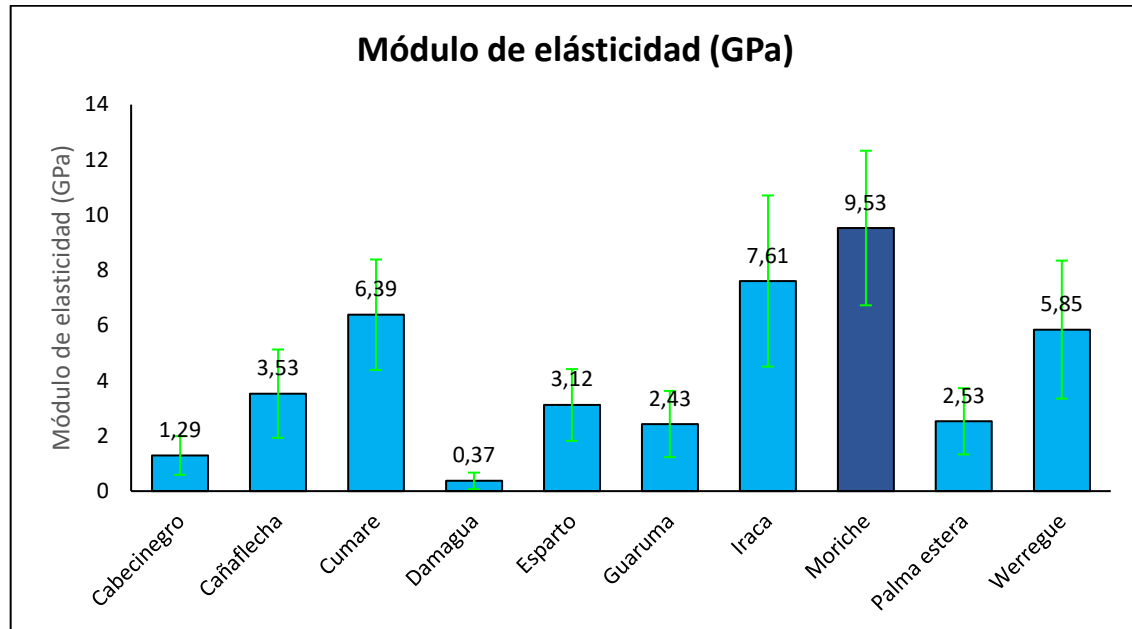


Figura 8. *Módulo de elasticidad fibras naturales colombianas.*

Fuente: Autores.

La Figura 8 nos muestra los valores de las fibras naturales colombianas escogidas para el análisis, teniendo a la fibra de moriche con mayor módulo de elasticidad (9,53 GPa), seguido por las fibras de iraca (7,61 GPa), cumare (6,39 GPa) y werregue (5,85 GPa). Los valores más bajos los obtuvieron la fibra de damagua y cabecinegro.

De igual manera se realiza el análisis comparativo respecto a las fibras sintéticas:

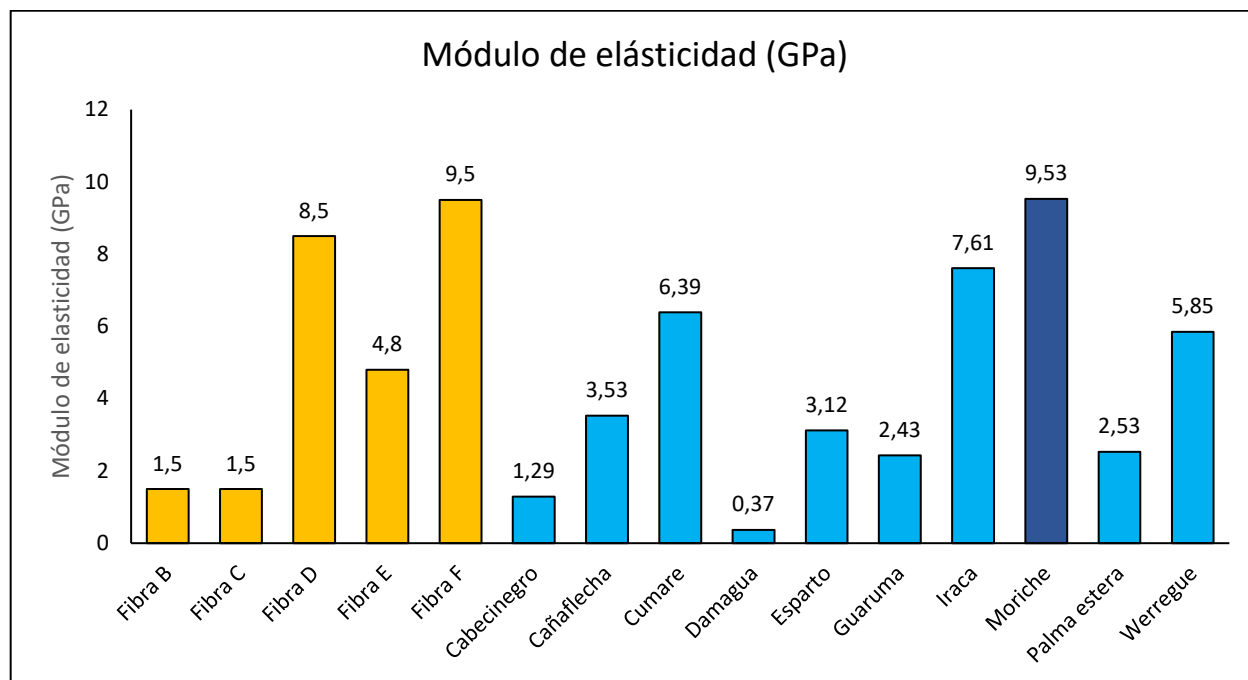


Figura 9. *Módulo de elasticidad fibras sintéticas vs fibras naturales.*

Fuente: Autores.

De la Figura 9 se puede observar el comportamiento sobresaliente de las fibras naturales colombianas frente a las sintéticas B (polipropileno modificado), C (polipropileno modificado) y E (polímero de alto desempeño y polipropileno virgen), con respecto al módulo de elasticidad. Se descartan las fibras naturales de cabecinegro y damagua por presentar bajos valores de módulo de elasticidad.

La fibra natural de la palma de moriche es la que mayor módulo de elasticidad presenta siendo esta fibra la de mayor potencial para ser usada en los concretos hidráulicos.

2.4. FIBRAS NATURALES COLOMBIANAS CON POTENCIAL PARA SER USADAS EN EL CONCRETO HIDRAULICO UBICADAS EN LA REGIÓN CARIBE

Debido a la escasa información en la literatura referente a las características morfológicas y mecánicas de fibras extraídas de plantas autóctonas de la región caribe colombiana se optó por tomar las suministradas por la Tabla 9, teniendo así las siguientes fibras:

Tabla 9. Fibras naturales localizadas en la región Caribe.

Fibra	Ubicación geográfica
Cañaflecha	Córdoba y Sucre
Palma estera	Cesar
Palma Iraca	Municipios de Usicurí Atlántico, San Juan Nepomuceno, María la Baja en Bolívar, Galicia, Santa Rosa y Buriticá en el Magdalena.

Fuente: Tomado de (Mora Espinosa, 2017).

De igual manera se procedió a realizar el análisis comparativo entre las fibras sintéticas.

2.4.1. Comparación físico-mecánica entre las fibras sintéticas presentes en el mercado y las fibras naturales autóctonas de la región caribe

De la Figura 10 se puede observar que las tres fibras naturales (cañaflecha, palma estera, palma iraca) seleccionadas de la región caribe tienen mayor resistencia a tracción que las fibras sintéticas de polipropileno modificado B y C utilizadas en el concreto para reducir la fisuración por retracción. Esto puede dar indicios de su potencial como candidatas para ser usadas en los concretos hidráulicos respecto a su propiedad a tracción.

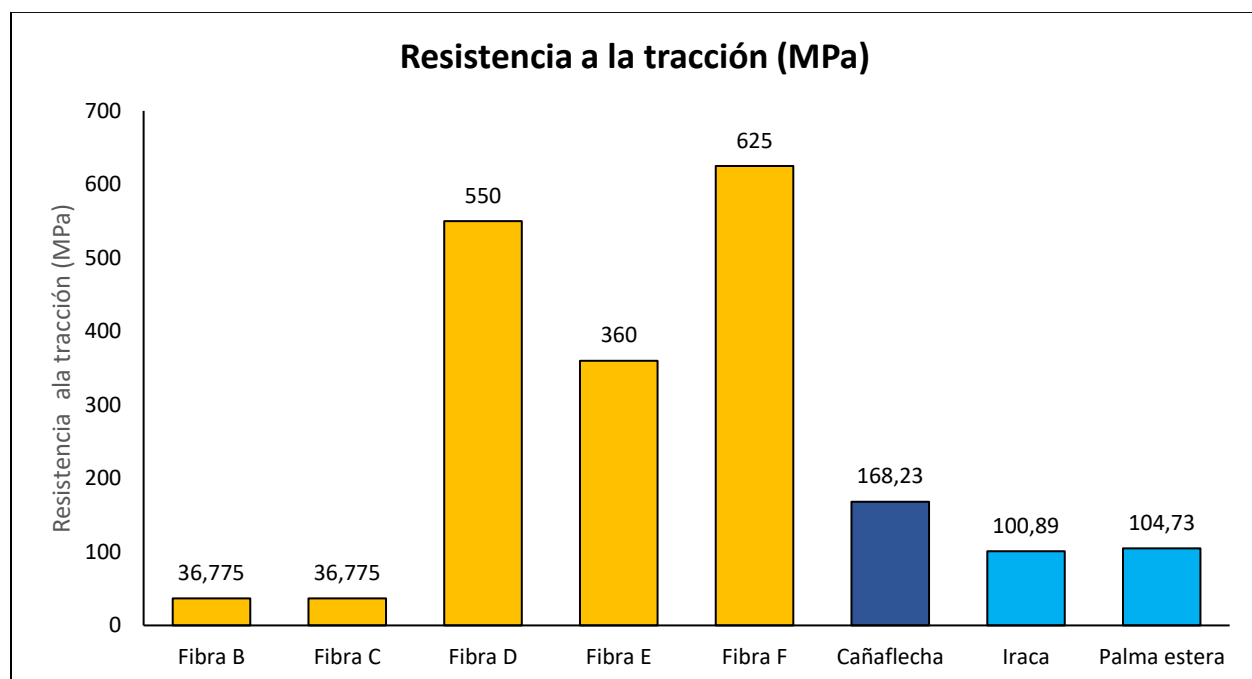


Figura 10. Resistencia a tracción fibras sintéticas vs fibras naturales de la región caribe.

Fuente: Autores.

De la Figura 11 se puede observar que las tres fibras seleccionadas de la región caribe presentan mayor módulo de elasticidad que las fibras sintéticas B y C, teniendo a la fibra natural de la palma de iraca con un módulo de elasticidad mayor que los mostrados por tres fibras sintéticas. Lo que muestra claramente que las tres fibras seleccionadas de la región caribe potenciales candidatas para usos en concretos hidráulicos.

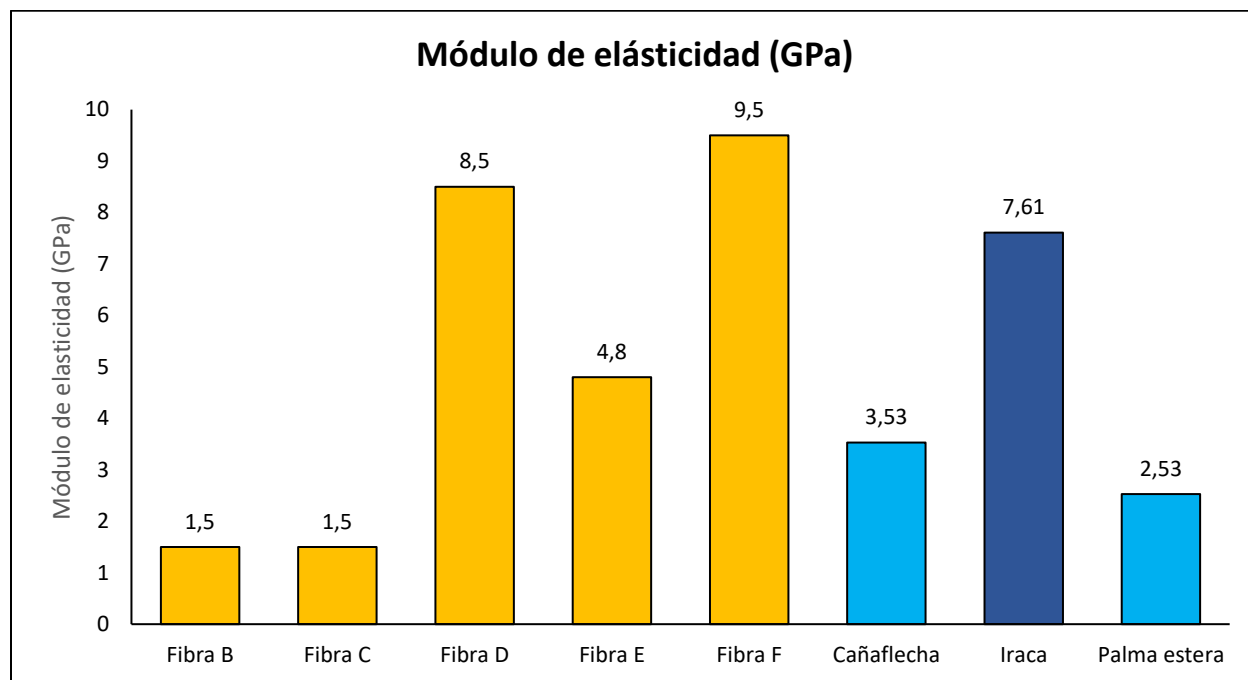


Figura 11. *Módulo de elasticidad fibras sintéticas vs fibras naturales de la región caribe.*

Fuente: Autores.

De lo anterior podemos deducir que, en base a las propiedades de tracción y módulo de elasticidad, las fibras de Iraca, Caña Flecha y Palma Estera son alternativas válidas a las fibras sintéticas fibra B y Fibra C, que se encuentran presente en el mercado colombiana para prevenir la fisuración por retracción plástica en los concretos hidráulicos.

Hay que destacar que aunque las tres fibras son alternativa válida para usos en concretos hidráulicos en base a sus propiedades a tracción y módulo de elasticidad, se requieren estudios que indiquen el comportamiento de estas fibras frente a los compuestos químicos presentes en la matriz del concreto, además sabiendo la naturaleza hidrófila de las fibras naturales de origen vegetal (Dittenber & Gangarao, 2012; Kabir et al., 2012; Shah, 2013; Sen & Jagannatha Reddy, 2014; Nunna et al., 2012), como esto podría afectar la unión con la matriz del concreto y que tratamientos se podrían efectuar en las fibras naturales para mejorar la relación con la matriz del concreto. Sabiendo que este es un enfoque meramente químico, se dejan abierta las futuras investigaciones con relación a este campo.

3. CONCLUSIONES

En esta monografía se investigaron y compararon las propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales a nivel mundial, nacional (Colombia) y local (región Caribe), esto con la intención de identificar las fibras naturales con mejor comportamiento mecánico para ser implementadas en el concreto hidráulico. Las propiedades mecánicas de las fibras dependen de algunos factores como lo son el contenido de celulosa, el origen, diámetro y longitud de la fibra, entre otros, causando variaciones en los valores de resistencia a tracción, módulo de elasticidad y elongación.

Se observa que a nivel mundial la hoja de piña tiene gran potencial para ser implementada en el concreto hidráulico debido a sus propiedades de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y elongación. En Colombia, se puede observar que las fibras naturales con mejores propiedades mecánicas anteriormente mencionadas son las fibras de moriche y guérregue, por lo que es de gran importancia analizar el comportamiento de estas fibras en investigaciones futuras. El moriche presentó mejores valores de resistencia a la tracción que algunas fibras sintéticas tomadas como referencia a excepción de la fibra sintética F (polipropileno y polietileno). Se concluye que, en la región Caribe, la fibra con mejores valores de resistencia es la cañaflecha encontrada en gran cantidad en Sucre y Córdoba. Esta fibra tiene gran variedad de usos debido a sus características, y podría ser potencial al ser implementada en el concreto hidráulico.

Los resultados de esta investigación demostraron lo importante que es revisar y analizar las propiedades mecánicas de las fibras naturales y compararlas con las fibras hechas por el hombre, ya que se evidenció que fibras naturales podrían comportarse mecánicamente igual o mejor que fibras sintéticas y metálicas.

Se observó que las fibras naturales colombianas tienen buenas propiedades mecánicas y por tanto se recomienda: 1) ampliar investigaciones y realizar pruebas físicas con el fin de encontrar otras fibras naturales colombianas, como los tallos de plátano, de hoja de palma africana, de palma dulce, de palma de vino y el mimbre, debido a que existe gran disponibilidad de este material a nivel local y que podrían tener un buen comportamiento al ser implementadas en concretos hidráulicos. 2) Incluir tratamientos físicos y químicos adecuados a fibras naturales colombianas para conseguir mejores propiedades mecánicas. 3) Implementar en los concretos hidráulicos fibras

naturales amigables con el medio ambiente que puedan igualar o superar las propiedades mecánicas de las fibras sintéticas o hechas por el hombre, para así reducir emisiones de CO₂, costos de producción, y emplear materiales biodegradables con menores tiempos de descomposición.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña Caro, A. (2018). *Análisis comparativo de resistencia a compresión en muros de mampostería, por medio del uso de fibras de carbono y basalto para procesos de restauración y conservación*. Universidad de Cartagena.
- Akil, H. M., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S., Ishak, Z. A. M., & Abu Bakar, A. (2011). Kenaf fiber reinforced composites: A review. In *Materials and Design* (Vol. 32, Issues 8–9, pp. 4107–4121). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.008>
- Alavi Nia, A., Hedayatian, M., Nili, M., & Sabet, V. A. (2012). An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 46, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.01.009>
- Almusallam, T. H., Siddiqui, N. A., Iqbal, R. A., & Abbas, H. (2013). Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 58, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.02.005>
- Altalabani, D., Bzeni, D. K. H., & Linsel, S. (2020). Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119084. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>
- Andrade, S. (2020). *Você sabe qual a diferença entre a micro e a macrofibra sintética?* - YouTube.
- Asim, M., Uddin, G. M., Jamshaid, H., Raza, A., Rehman, Z. ul, Hussain, U., Satti, A. N., Hayat, N., & Arafat, S. M. (2020). Comparative experimental investigation of natural fibers reinforced light weight concrete as thermally efficient building materials. *Journal of Building Engineering*, 31(March), 101411. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101411>
- Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(7), 939–948. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4)

- Baley, Christophe, & Bourmaud, A. (2014). Average tensile properties of French elementary flax fibers. *Materials Letters*, 122, 159–161. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.02.030>
- Benito, F., Parra, C., Valcuende, M., Miñano, I., & Rodríguez, C. (2015). Método para cuantificar la segregación en hormigones autocompactantes. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 6(2), 48–63.
- Bezazi, A., Belaadi, A., Bourchak, M., Scarpa, F., & Boba, K. (2014). Novel extraction techniques, chemical and mechanical characterisation of Agave americana L. natural fibres. *Composites Part B: Engineering*, 66, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.014>
- Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G., & Can, Ö. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 61, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.043>
- Borhan, T. M., Abo Dhaheer, M. S., & Mahdi, Z. A. (2020). Characteristics of Sustainable Self-compacting Concrete Reinforced by Fibres from Waste Materials. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 4359–4367. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04460-3>
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2016). Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 126, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.035>
- Bustos, D. (2017). *Área Industrias Forestales - ppt video online descargar*.
- Colombo, M., Martinelli, P., & di Prisco, M. (2016). On the blast resistance of high performance tunnel segments. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(1–2), 117–131. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0480-7>
- Cordoba, A., Sierra, Z., & Anderson, J. (2013). *Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto*. Universidad EAFIT.
- CUELLAR, A., & MUNOZ, I. (2010). Dyna. In *DYNA* (Vol. 77, Issue 162). Universidad Nacional de Colombia.
- De, F., Silva, A., Zhu, D., Mobasher, B., Dias, R., & Filho, T. (2011). *Impact Behavior of Sisal Fiber Cement Composites under Flexural Load Fundamental Research on Materials and*

Structural Design of Highly Durable FRP Bar Reinforced Sea-Water Sea-Sand Concrete in Marine Environment View project Geopolymer Design and Applicat.

- Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C., & Valenza, A. (2014). Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene). *Construction and Building Materials*, 58, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.026>
- 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>
- Drdlová, M., Buchar, J., Krátký, J., & Řídký, R. (2015). Blast resistance characteristics of concrete with different types of fibre reinforcement. *Structural Concrete*, 16(4), 508–517. <https://doi.org/10.1002/suco.201400080>
- Estrada Mejía, M. (2009). Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para el refuerzo de materiales compuestos. In *instname: Universidad de los Andes*. Uniandes.
- Fiore, V., Scalici, T., & Valenza, A. (2014). Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 106(1), 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.016>
- Gassan, J., Chate, A., & Bledzki, A. K. (2001). Calculation of elastic properties of natural fibers. *Journal of Materials Science*, 36(15), 3715–3720. <https://doi.org/10.1023/A:1017969615925>
- Gómez, M. (2017). Análisis térmico del mortero adicionado con fibra de coco [Universidad de Cartagena]. In *Universidad de Cartagena*. <http://hdl.handle.net/11227/5752>
- Gómez, S., Mora, W., & Valencia, B. (2017). Caracterización física y química de la fibra natural de esparto (*Juncus ramboi* subsp. *colombianus*) como alternativa e refuerzo en materiales compuestos. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 8(1). <https://doi.org/10.24054/19009178.v1.n1.2017.3273>
- Grdic, Z. J., Curcic, G. A. T., Ristic, N. S., & Despotovic, I. M. (2012). Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*,

27(1), 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.044>

Gull, I., & Tantray, M. A. (2020). Characteristic influence of carbon fibers on fresh state, mechanical properties and microstructure of carbon fiber based self compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.646>

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>

Indran, S., & Raj, R. E. (2015). Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* stem. *Carbohydrate Polymers*, 117, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.09.072>

Instron. (2020). *Resistencia al impacto - Instron*.

Izaguirre, A., Lanas, J., & Alvarez, J. I. (2011). Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 25(2), 992–1000. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.080>

John, M. J., & Anandjiwala, R. D. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, 29(2), 187–207. <https://doi.org/10.1002/pc.20461>

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: Engineering*, 43(7), 2883–2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>

Karihaloo, B. L., & Ghanbari, A. (2012). Mix proportioning of self-compacting high- and ultra-high-performance concretes with and without steel fibres. *Magazine of Concrete Research*, 64(12), 1089–1100. <https://doi.org/10.1680/mac.11.00190>

Kosmatka, Steven H.; Wilson, M. L. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications, Methods and Materials*.

Lee, J. Y., Shin, H. O., Yoo, D. Y., & Yoon, Y. S. (2018). Structural response of steel-fiber-reinforced concrete beams under various loading rates. *Engineering Structures*, 156, 271–

283. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.052>
- Li, N., Jin, Z., Long, G., Chen, L., & Fu, Q. (2021). Impact resistance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete (SCC) at high strain rates. *Journal of Building Engineering*, 38, 102212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102212>
- Long, G., Gao, Y., & Xie, Y. (2015). Designing more sustainable and greener self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.072>
- Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 2(2), 35–47.
- Meyer, D. M., Boshoff, W. P., & Combrinck, R. (2020). Utilising super absorbent polymers as alternative method to test plastic shrinkage cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 248, 118666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118666>
- Mezzal, S. K., Al-Azzawi, Z., & Najim, K. B. (2021). Effect of discarded steel fibers on impact resistance, flexural toughness and fracture energy of high-strength self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 121, 103271. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103271>
- MinAmbiente. (2016, September). *Colombia, el segundo país más biodiverso del mundo | Minciencias*.
- Mo, K. H., Yap, S. P., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Bu, C. H. (2014). Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.016>
- Mora Espinosa, W. J. (2017). Materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales colombianas y matriz bioepoxy para aplicaciones en la industria automotriz. In *Facultad de ingenierías y arquitectura maestría en ingeniería ambiental universidad de pamplona*.
- Mora, W. (2017). *william javier mora espinosa - Google Académico*.
- Muñoz, M., Hidalgo, M., & Mina, J. (2014). Fibras de Fique una alternativa para el reforzamiento

de plásticos. *Rev. Bio. Agro*, 12(2), 60–70.
<http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a07.pdf>

Naraganti, S. R., Pannem, R. M. R., & Putta, J. (2019). Impact resistance of hybrid fibre reinforced concrete containing sisal fibres. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(2), 297–305.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.12.004>

Nasir, M., Baghabra Al-Amoudi, O. S., & Maslehuddin, M. (2017). Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather. *Construction and Building Materials*, 152, 943–953.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.068>

Netinger Grubeša, I., Marković, B., Gojević, A., & Brdarić, J. (2018). Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 184, 473–484.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.014>

Nunna, S., Chandra, P. R., Shrivastava, S., & Jalan, A. K. (2012). A review on mechanical behavior of natural fiber based hybrid composites. In *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (Vol. 31, Issue 11, pp. 759–769). <https://doi.org/10.1177/0731684412444325>

Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 717–736.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.007>

Ortega Sua, L. M., & Ariza Roncancio, A. E. (2018). *Evaluación de la resistencia de un concreto reforzado con fibras al impacto de una detonación Lina Marcela Ortega Sua 506017 Anderson Esneyder Ariza Roncancio 506018 Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería Bogotá 2018*. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

Perez, J., & Salas, A. (2018). Mejoramiento de la resistencia a la tracción del concreto destinado a pavimento rígido por medio de la implementación de macrofibras metálicas [Universidad de Cartagena]. In *Universidad de Cartagena*. <http://hdl.handle.net/11227/6990>

Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of

- concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, 38–48.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>
- Placet, V. (2009). Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(8), 1111–1118. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.031>
- Placet, V., Trivaudey, F., Cisse, O., Gucheret-Retel, V., & Boubakar, M. L. (2012). Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(2), 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.10.019>
- Raamesh, A. S. P., Balasundaram, N., Karthik, V., & Johnpaul, V. (2020). Structural performance of fiber reinforced concrete made from industrial waste products. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.512>
- Rendon, A., & Neyra, L. (2020). *Fibras naturales | Biodiversidad Mexicana*.
- Rousakis, T. (2016). Natural fibre rebar cementitious composites. In *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction* (pp. 205–214). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00009-1>
- Saba, N., Paridah, M. T., & Jawaid, M. (2015). Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 76, pp. 87–96). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>
- Saliba, C. C., Oréface, R. L., Carneiro, J. R. G., Duarte, A. K., Schneider, W. T., & Fernandes, M. R. F. (2005). Effect of the incorporation of a novel natural inorganic short fiber on the properties of polyurethane composites. *Polymer Testing*, 24(7), 819–824. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.07.008>
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraiannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>

- Sanjay, M. R., Siengchin, S., Parameswaranpillai, J., Jawaaid, M., Pruncu, C. I., & Khan, A. (2019). A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 207, pp. 108–121). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.083>
- Sathishkumar, T. P., Navaneethakrishnan, P., & Shankar, S. (2012). Tensile and flexural properties of snake grass natural fiber reinforced isophthallic polyester composites. *Composites Science and Technology*, 72(10), 1183–1190. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.04.001>
- Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- Sen, T., & Jagannatha Reddy, H. N. (2014). 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>
- Shah, D. U. (2013). Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: A critical review. In *Journal of Materials Science* (Vol. 48, Issue 18, pp. 6083–6107). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7458-7>
- Suárez Castañeda, J. L., Restrepo Montoya, J. W., Quinchía Figueroa, A., & Mercado Navarro, F. A. (2017). Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. *Revista Tecnura*, 21(51), 57. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a04>
- 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. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 41, Issue 10, pp. 1329–1335). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001>
- Thiruchitrambalam, M., Alavudeen, A., Athijayamani, A., Venkateshwaran, N., & Perumal, A. E. (2009). *IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF BANANA/KENAF POLYESTER HYBRID COMPOSITES USING SODIUM LAULRYL SULFATE TREATMENT*.
- thygesen, andres. (2006). *Properties of hemp fibre polymer composites - An optimisation of fibre*

properties using novel defibration methods and fibre characterisation - PDF Free Download.

- Vicente, M. A., Mínguez, J., & González, D. C. (2019). Computed tomography scanning of the internal microstructure, crack mechanisms, and structural behavior of fiber-reinforced concrete under static and cyclic bending tests. *International Journal of Fatigue*, 121, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.11.023>
- Vickers, L., van Riessen, A., & Rickard, W. D. A. (2015). *Fire-Resistant Geopolymers*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-311-8>
- Yahaghi, J., Muda, Z. C., & Beddu, S. B. (2016). Impact resistance of oil palm shells concrete reinforced with polypropylene fibre. *Construction and Building Materials*, 123, 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.026>
- Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites - A review. *Composites Part B: Engineering*, 56, 296–317. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>
- Yew, M. K., Othman, I., Yew, M. C., Yeo, S. H., & Mahmud, H. B. (2011). Strength properties of hybrid nylon-steel and polypropylene-steel fibre-reinforced high strength concrete at low volume fraction. *International Journal of Physical Sciences*, 6(33), 7584–7588. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.736>
- Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2019). Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103389. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389>