



Estudio de materiales compuestos de fibras vegetales para el refuerzo de estructuras de bajo coste en Brasil.

Documento:

Memoria

Autor/Autora:

Jordi Rodríguez Queralt

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Luis Enrique Mercedes Cedeño

Titulación:

Grado en ingeniería mecánica

Convocatoria:

Primavera 2023

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS



Agradecimientos

Me gustaría agradecer y dedicar el proyecto a mis padres, Alfonso y Mireia, puesto que sin ellos cualquier investigación no hubiera sido posible. Ellos son el motor de mi vida y la razón por la que hoy pueda elaborar este proyecto.

También dar las gracias a un compañero de vida que nos dejó hace ya unos meses y me ha hecho ser la persona que soy hoy en día, mi perro Messi.

Tampoco habría sido posible sin la confianza de mis amigos y mi núcleo social, gracias por animarme y hacerme feliz.

Por último, agradecer a mi profesor y tutor Luis Enrique Mercedes Cedeño ya que me ha guiado en el transcurso de esta investigación y me ha hecho aprender una infinidad de disciplinas que desconocía acerca de los materiales compuestos de fibras vegetales.



Resumen

Recientemente, los materiales compuestos de fibra vegetales han ido ganando fuerza como objeto de estudio debido a sus ventajosas propiedades tales como su bajo coste, su biodegradabilidad o su carácter sostenible.

En el presente trabajo se realiza un estudio teórico de los materiales compuestos de fibras vegetales con el fin de poder plantear una solución sostenible al desarrollo de las estructuras de bajo coste que existen hoy en día en Brasil.

Para ello, se han elaborado diversas investigaciones en torno a las actuales condiciones de Brasil, una definición de los materiales compuestos de fibras vegetales, así como una serie de tipologías de éstas de las que se han obtenido sus propiedades mecánicas. En este punto se reparará en la prometedora opción de la fibra vegetal como refuerzo de una matriz cementicia al mejorar sus propiedades mecánicas tales como la resistencia a tracción, la tenacidad o la durabilidad del compuesto.

La segunda parte del proyecto tiene como fin elegir la fibra más conveniente para su uso en Brasil. Según unos criterios de producción, viabilidad y fiabilidad, se ha elegido la fibra vegetal de sisal como la indicada para reforzar matrices cementicias, por lo que se ha contextualizado de una forma más extensa dicha fibra vegetal realizando un recorrido histórico tanto en Brasil como en el mundo, así como también un análisis de sus propiedades y características más al detalle.

Para concluir, se ha visto de qué manera se aplica la solución propuesta en ejemplos prácticos y, a su vez, el potencial que tiene como para reforzar construcciones de cara al futuro.

Abstract

Recently, plant fiber composite materials have been gaining strength as an object of study due to their different properties such as their low cost, their biodegradability or their sustainable character.

In the present work, a theoretical study of plant fiber composite materials is carried out in order to propose a sustainable solution to the development of low-cost structures that exist today in Brazil.

For this purpose, several researches have been elaborated around the current conditions in Brazil, a definition of plant fiber composite materials, as well as a series of typologies of these from which their mechanical properties have been obtained. At this point, the promising option of vegetable fiber as reinforcement of cementitious matrix by improving its mechanical properties such as tensile strength, toughness or durability of the composite will be discussed.

The second part of the project aims at choosing the most suitable fiber for use in Brazil. According to production, feasibility and reliability criteria, the sisal vegetable fiber was chosen as the most suitable for reinforcing cement matrices, so that a more extensive contextualization of this vegetable fiber was carried out by making a historical review both in Brazil and in the world, as well as a more detailed analysis of its properties and characteristics.

In conclusion, it has been shown how the proposed solution is applied in practical examples and, in turn, the potential it has to reinforce constructions for the future.



Contenido

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 OBJETO	8
1.2 ALCANCE	8
1.3 REQUISITOS	9
1.4 JUSTIFICACIÓN	9
2 ESTRUCTURAS DE BAJO COSTE	10
3 BRASIL	11
3.1 CONDICIONES DEL PAÍS	11
3.2 VIVIENDAS DE BAJO COSTE EN BRASIL	12
4 MATERIALES COMPUESTOS	13
4.1 TIPOLOGÍA DE MATRIZ	13
4.2 DEFINICIÓN DE COMPUESTO CEMENTÍCEO REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES	14
4.3 ANÁLISIS DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS VEGETALES	15
5 FIBRAS VEGETALES	16
5.1 DEFINICIÓN	16
5.2 PRODUCCIÓN POR AÑO DE FIBRAS VEGETALES	17
5.3 ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LAS FIBRAS VEGETALES	18
6 TIPOS DE FIBRAS PRODUCIDAS EN BRASIL	19
6.1 FIBRA DE COCO	19
6.2 FIBRA DE CURAUÁ	20
6.3 FIBRA DE LINO	21
6.4 FIBRA DE SISAL	22
6.5 FIBRA DE YUTE	23
6.6 FIBRA DE ALGODÓN	25
6.7 FIBRA DE BAMBÚ	26
6.8 EJEMPLOS PRÁCTICOS DE FCRM	27
7 MÉTODOS PARA EVITAR LA DEGRADACIÓN DE LA FIBRA	27
7.1 TRATAMIENTOS PRINCIPALES	27
7.2 EJEMPLO PRÁCTICO	28
8 ELECCIÓN DE LA FIBRA VEGETAL	29
8.1 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA FIBRA VEGETAL DE SISAL	29
8.2 HISTORIA DEL SISAL EN BRASIL	30
8.3 CARACTERÍSTICAS Y MÉTODO DE EXTRACCIÓN EN BAHÍA	32
8.4 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES CON OTRAS FIBRAS	34
8.5 RESIDUOS DEL SISAL	34
9 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL FCRM	35



9.1	LUIS MERCEDES, LUIS GIL Y ERNEST BERNAT [51]	36
9.1.1	<i>Materiales utilizados</i>	36
9.1.2	<i>Resultados y conclusiones</i>	36
9.2	INVESTIGACIÓN EN LA FATIGA	39
9.3	MEJORA DE LA DURABILIDAD DEL FCRM DE SISAL.....	39
10	APLICACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN	41
10.1	ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA.....	41
10.2	PANELES SÁNDWICH	42
10.3	ESCAYOLA	42
10.4	OTRAS INVESTIGACIONES	43
11	IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA SOLUCIÓN EN BRASIL	44
12	CONCLUSIONES	44
13	PRESUPUESTO	45
13.1	PRESUPUESTO DE MATERIALES Y LICENCIAS	45
13.2	PRESUPUESTO DE INVESTIGACIÓN	45
13.3	PRESUPUESTO TOTAL.....	46
14	REFERENCIAS.....	2



Índice de tablas

TABLA 1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS VEGETALES [12]	15
TABLA 2: PRODUCCIÓN ANUAL DE FIBRAS VEGETALES	18
TABLA 3: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COCO	19
TABLA 4: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CURAUÁ	20
TABLA 5: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LINO	22
TABLA 6: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SISAL	23
TABLA 7: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL YUTE	24
TABLA 8: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALGODÓN	25
TABLA 9: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL BAMBÚ	26
TABLA 10: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS VEGETALES	34
TABLA 11: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FCRM DE SISAL	37
TABLA 12: PRESUPUESTO DE MATERIALES Y LICENCIAS	45
TABLA 13: PRESUPUESTO DE INVESTIGACIÓN	46
TABLA 14: PRESUPUESTO TOTAL	46



Índice de figuras

-FIGURA 1: FCRM COMO REFUERZO DE MURO [64]	15
-FIGURA 2: TIPOS DE FIBRA VEGETAL [15]	17
-FIGURA 3: FIBRA VEGETAL DE COCO [20]	20
-FIGURA 4: FIBRA VEGETAL DE CURAUÁ [65]	21
-FIGURA 5: FIBRA VEGETAL DE LINO [66]	22
-FIGURA 6: FIBRA VEGETAL DE SISAL [16]	23
-FIGURA 7: FIBRA VEGETAL DE YUTE [67]	24
-FIGURA 8: FIBRA VEGETAL DE ALGODÓN [68]	25
-FIGURA 9: FIBRA VEGETAL DE BAMBÚ [29]	26
-FIGURA 10: PLANTA DE SISAL [69]	29
-FIGURA 11: PAÍSES CON MÁS PRODUCCIÓN DE SISAL [44]	30
-FIGURA 12: SECANDO SISAL EN BAHÍA [70]	33
-FIGURA 13: DECORTICADO DEL SISAL [47]	35
-FIGURA 14: HUMO DE SÍLICE PARA HORMIGÓN [71]	40
-FIGURA 15: HIDRÓXIDO DE CALCIO [72]	41

Índice de gráficos

GRÁFICO 1: ÁMBITO DE APLICACIONES DE LA FIBRA VEGETAL [18]	18
GRÁFICO 2: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE SISAL (1898-2011) [45]	32

1. Introducción

1.1 Objeto

El objetivo del proyecto se basa en estudiar a profundidad los principales materiales compuestos de fibra vegetal para, a la postre, elegir el material más apto para el refuerzo de una posible estructura de bajo coste en Brasil.

Para ello me he marcado diversos objetivos:

- Identificar las fibras vegetales con las propiedades mecánicas más aptas para el refuerzo de estructuras en Brasil.
- Revisar bibliográficamente los diferentes estudios realizados sobre materiales compuestos con fibras vegetales.
- Estudiar las actuales condiciones de Brasil junto con la problemática existente en las estructuras de bajo coste.
- Profundizar en la opción más apta en base a un estudio de las necesidades en Brasil.

1.2 Alcance

Paquete de trabajo 1: Estudio de la actualidad en Brasil.

Se profundizará en la búsqueda histórica del avance de materiales compuestos con fibras vegetales en Brasil. Dicho estudio recopilará información económica, social y política de la evolución del mercado sostenible dirigido al material compuesto con fibra vegetal.

Paquete de trabajo 2: Revisión bibliográfica.

Se realizará una revisión detallada de la literatura disponible sobre materiales compuestos de fibras vegetales y su aplicación en la construcción y refuerzo de estructuras de bajo coste en Brasil. Este paquete de trabajo incluirá la búsqueda, selección y análisis crítico de artículos científicos y otros documentos relevantes.

Paquete de trabajo 3: Evaluación de materiales compuestos y técnicas de refuerzo existentes con fibras vegetales.

Se realizará una evaluación exhaustiva de diferentes materiales compuestos y técnicas de refuerzo existentes en la actualidad para el refuerzo de estructuras de bajo coste en Brasil. Este paquete de trabajo incluirá la identificación y evaluación de diferentes materiales compuestos y técnicas de refuerzo existentes, así como la comparación de sus ventajas y desventajas.

Paquete de trabajo 4: Síntesis de la información y elaboración de conclusiones.

Se sintetizará toda la información recopilada en los dos paquetes de trabajo anteriores y se elaborarán conclusiones sobre el estado actual de los materiales compuestos de fibras vegetales para el refuerzo de estructuras de bajo coste en Brasil. Este paquete de trabajo incluirá la elección de un tipo de material compuesto con un tipo de fibra vegetal, basándome en diversos criterios como la producción, la viabilidad y la fiabilidad de la solución.

No se tomarán en consideración estructuras complejas y/o de presupuesto elevado dado que el enfoque es ayudar a construcciones de bajo coste. Construcciones que no engloban cálculos profundos ni profesionales para la construcción. Tampoco se pretende implementar ningún tipo de material obtenido de manera costosa, puesto que se quiere dar una solución con fibras vegetales locales y a disposición de la población brasileña.



1.3 Requisitos

A continuación, ejemplificaré en formato de lista los diferentes requisitos para desempeñar un elaborado proyecto de fin de grado:

- Acceso a bibliografía relevante y actualizada sobre materiales compuestos de fibras vegetales y su aplicación en la construcción y refuerzo de estructuras de bajo coste en Brasil.
- Se deberán respetar los tiempos exigidos en el calendario de la asignatura.
- Se deberá utilizar correctamente la citación de artículos académicos, documentos científicos...

1.4 Justificación.

La necesidad de realizar este proyecto surge a partir de la creciente demanda de materiales compuestos para la construcción de estructuras de bajo coste en Brasil. Actualmente, los materiales compuestos de fibras vegetales se presentan como una alternativa económica y sostenible a los materiales tradicionales de refuerzo, como el acero y el hormigón. Cada vez hay más interés por este tipo de recursos por la comunidad científica. La alternativa de usar fibras vegetales como refuerzos de polímeros y morteros, es un ejemplo de ello.

El objetivo principal del proyecto es realizar un estudio teórico sobre los materiales compuestos de fibras vegetales, sus propiedades mecánicas y sus aplicaciones en la construcción de estructuras de bajo coste en Brasil. Además, se buscará identificar los principales retos y limitaciones técnicas asociadas a estos materiales, con el fin de proponer soluciones y mejorar su desempeño.

Este proyecto se enmarca en un contexto de creciente interés por la sostenibilidad y la eficiencia en la construcción de estructuras en Brasil. Las posibles ventajas del enfoque adoptado en este proyecto son diversas. Por un lado, se espera que los materiales compuestos de fibras vegetales permitan reducir los costes de construcción y mejorar la eficiencia energética de las estructuras, gracias a sus múltiples propiedades positivas. Por otro lado, la utilización de estos materiales también puede contribuir a reducir la huella de carbono de la construcción, ya que se trata de materiales renovables y biodegradables.

También es necesario tener en cuenta las posibles desventajas asociadas al enfoque adoptado. En particular, los materiales compuestos de fibras vegetales pueden presentar limitaciones en cuanto a su resistencia y durabilidad en comparación con los materiales de refuerzo tradicionales. Es por eso que no abarcaremos estructuras de carácter complejo, tomando conciencia de nuestros límites.



2 Estructuras de bajo coste

Como se estipula en el objeto del proyecto, el objetivo del trabajo es elegir el material compuesto de fibra vegetal más apto para las estructuras de bajo coste y, con estas estructuras, principalmente la atención se dirigirá a la construcción de viviendas.

Una estructura de bajo coste se refiere a una construcción que se realiza utilizando materiales y métodos que minimizan los gastos en comparación con las estructuras convencionales. En términos de costos de materiales, una estructura de bajo coste utiliza materiales económicos o alternativos en lugar de materiales tradicionales más costosos como el acero o el concreto. Esto puede incluir el uso de materiales reciclados, de menor precio o de origen local que cumplan con los requisitos de resistencia y seguridad necesarios.

En cuanto a la fabricación, las estructuras de bajo coste se caracterizan por utilizar métodos de construcción más sencillos y eficientes, lo que reduce los costos de mano de obra y el tiempo necesario para completar el proyecto.

En términos de mantenimiento, las estructuras de bajo coste se diseñan y construyen con el objetivo de minimizar los gastos a largo plazo. Esto implica utilizar materiales duraderos y de fácil mantenimiento, así como incorporar soluciones de diseño que reduzcan la necesidad de reparaciones o reemplazos frecuentes. Además, se pueden implementar estrategias de eficiencia energética y sostenibilidad para reducir los costos operativos a largo plazo, como el uso de sistemas de iluminación o climatización más eficientes.

En base a ello, se quiere implantar la solución en el muro de la vivienda, es decir, en las paredes. Consideramos que los materiales compuestos con los que queremos trabajar e investigar tomarán una relevancia importante y un uso adecuado en esta parte de la vivienda descartando la cubierta o el suelo entre otros.[1]



3 Brasil

La construcción de estructuras de bajo coste es un desafío importante en Brasil, donde se requieren soluciones asequibles y sostenibles para mejorar las condiciones de vivienda. En este contexto, los FCRM han surgido como una opción prometedora debido a su bajo costo y propiedades mecánicas favorables.

3.1 Condiciones del país

Por un lado, Brasil es un gran productor de fibras vegetales debido a la región amazónica y su increíble biodiversidad. La diversidad de la flora tropical y el conocimiento de la utilización popular de los productos vegetales sugieren que existan cerca de 200 especies vegetales con un posible futuro económico. Se ha registrado que en la Floresta Amazónica son conocidas hasta el momento 2.500 especies de árboles, en cambio, en los bosques templados de toda Europa, existen apenas 50 especies. [2]

Por otro lado, Brasil también presume de instituciones y universidades de gran calibre que favorecen la investigación bibliográfica, por poner dos ejemplos la Universidad de Sao Paulo [4] y la Universidad Estatal de Campinas [3] constan de una buena reputación. Este punto ayuda en gran medida a la búsqueda de los campos a estudiar en el proyecto

También existe una economía emergente en el país, según la OECD (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) Brasil se posiciona en el número 4 de exportadores de fibras vegetales en todo el mundo. En 2021 los principales exportadores de coco y otras fibras vegetales fueron India (\$382M), Sri Lanka (\$206M), Kenia (\$49,7M), Brasil (\$47,9M), y Filipinas (\$41,3M) [5]. Lo que lo convierte en un gran objetivo de investigación e indagación.

Además, en Brasil, el sector de la vivienda es responsable de aproximadamente el 26% del dinero total que circula en la industria de la construcción. [6]

3.2 Viviendas de bajo coste en Brasil

Por norma general, las estructuras de bajo coste en Brasil están ubicadas áreas urbanas o suburbanas y se caracterizan por tener una estructura básica construida a partir de bloques de hormigón, ladrillos cerámicos y paneles prefabricados. Según datos del Ministerio de Desarrollo Regional de Brasil se calcula que alrededor de 11 millones de personas en el país habita en estas viviendas. [7]



Figura 1: Viviendas de bajo coste en Brasil [63]

4 Materiales compuestos

Un material compuesto se define como la combinación de al menos 2 elementos que difieren en composición o forma a escala macroscópica. Los constituyentes mantienen su identidad por lo que funcionan como un conjunto.

Cada componente del compuesto se puede diferenciar y se observa una interfase definida entre ellos. Las características y rendimientos de un material compuesto vienen definidas por las propiedades de interfase

La fibra se usa como refuerzo, otorga las propiedades mecánicas de la fuerza y la rigidez. En cambio, la matriz, es el aglutinante que embebe las fibras cuya función es repartir la carga en ellas. Además, se encarga de proteger las fibras de condiciones medioambientales, mecánicas y cargas externas o de definir la temperatura de servicio y resistencia a agentes químicos.

4.1 Tipología de matriz

La matriz sirve para aglutinar el refuerzo (fibra) en la orientación adecuada, transferir la carga hacia y entre las fibras de manera uniforme, brindar resistencia a la propagación externa de grietas y daños inducidos, y brindar resistencia al corte por entrelazado. La matriz también protege las fibras de los elementos, incluidos los rayos UVA, la temperatura, la humedad, la corrosión química y la oxidación. La matriz generalmente establece las limitaciones de temperatura de servicio y la envolvente de aplicación. Para crear un material con altas prestaciones mecánicas, la compatibilidad química entre la fibra y la matriz y la compatibilidad con el proceso de fabricación son requisitos esenciales.

Las subcategorías termoestables y termoplásticas de matrices orgánicas son términos de uso frecuente. Las matrices termoestables suelen ofrecer termoplásticos con menor viscosidad, temperaturas y presiones más bajas durante la fabricación, técnicas preimpregnadas o forma húmeda y un costo más bajo. Las matrices termoplásticas, por otro lado, tienen una vida útil infinita, ciclos de procesamiento más rápidos y, en general, no requieren temperaturas bajas.

Según Besednjak [8] las matrices se pueden distinguir en tres tipos diferentes:

- Matrices metálicas
- Matrices cementicias o cerámicas
- Matrices poliméricas

Los compuestos de matriz metálica son compuestos que se caracterizan por el metal como matriz y que son reforzados normalmente con segundas fases, varios estudios mencionan a las fases de refuerzo más comunes que son las cerámicas en partículas (MMC cermets) o las fibras de distintos materiales como las de otros metales, carbono, boro y cerámicos.

Los compuestos de matriz cerámica engloban los materiales constituidos a base de cemento como su principal aglomerante, dentro de estos se encuentran la pasta de cemento, el mortero y el hormigón, entre ellos se diferencian por la combinación con las segundas fases que se realiza con la matriz.

Finalmente, las matrices poliméricas son las más comunes y pueden ir reforzados con vidrio, fibras de carbono y demás tipologías de fibra. Se consideran a las matrices poliméricas como el material compuesto por excelencia puesto que existe una gran producción de ellas, una alta gama de estudios realizados y presentan buenas propiedades mecánicas.

El proyecto tan sólo se enfocará en matrices cementíceas.

4.2 Definición de compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales

Definición por la norma UNE EN 12467:2013 [9]

“Se entiende por cemento reforzado con fibras el producto cuyo componente mayoritario es el cemento o aglomerantes hidráulicos. Las fibras de refuerzo pueden ser de uno o varios de los tipos siguientes: inorgánicos u orgánicos y sintéticos o naturales. No deben presentar áridos de tamaño superior a 4 mm y pueden añadirse los componentes que sean compatibles y no tengan influencia negativa en el comportamiento del producto”

El presente trabajo está enfocado en el uso de fibras vegetales como refuerzo de una matriz cementícea. Las siglas para describir este tipo de materiales compuestos son FRCM (fabric reinforced cementitious matrix).

Los sistemas FRCM son una alternativa a los FRP (polímeros reforzados con fibras) que recientemente son más utilizados en el mundo de la industria.

Los FRCM presentan unos beneficios parecidos a los FRP con respecto a su alta relación resistencia-peso. Con el fin de obtener un material compuesto compacto se debe asegurar el flujo y contacto adecuado entre la matriz y el refuerzo. La forma más eficaz de lograr esto es a través de la aplicación de tejidos como refuerzo (malla), ya que esto permite una cohesión apropiada del mortero entre las celdas que componen el tejido. Esta malla puede estar hecha de diversos materiales como fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de basalto, PBO (Poliparafenileno benzobisoxazol) y fibra vegetal.

Para entender el comportamiento de este tipo de material compuesto se ha de comprender que la resistencia a tracción viene dada por las mallas, y que estas fibras solo soportan la carga que el mortero es capaz de transmitir. Por tanto, la transmisión de tensiones matriz-malla es uno de los principales requisitos a considerar, así como la adaptabilidad geométrica de la malla y su estabilidad química (durabilidad) dentro de la matriz.[10]

Principales ventajas del FRCM:

- Naturaleza inorgánica y porosa del FRCM es compatible en buen grado con las estructuras de mampostería, con lo cual existe una compatibilidad en las deformaciones.
- Mejor resistencia al fuego que los compuestos de matriz orgánica FRP. Cuando las temperaturas superan los 200°, los FRP tienden a perder sus características y propiedades.
- Se presenta como un material más sostenible que los FRP, puesto que los FRCM no son ni peligrosos ni tóxicos cuando se aplican. a diferencia de algunas de las resinas químicas que son utilizadas en la adhesión del FRP.
- No se requiere una enseñanza profesionalizada por parte de los albañiles encargados, su aplicación es simple.

-Se puede reciclar y revertir de manera sencilla, dado que está formado de materiales reciclables.

Con todo, aunque presentan ciertas ventajas con respecto a los FRP, los materiales compuestos FCRM resultan menos eficaces en términos de capacidad portante. Puesto que está condicionado por la inferior adherencia de la matriz inorgánica, como también por la menor cantidad de fibras en la configuración de la malla. Además, los FRP con refuerzos presentan más rigidez y menor tiempo de espera para que su refuerzo sea efectivo.[11]



-Figura 1: FCRM como refuerzo de muro [64]

4.3 Análisis de las ventajas y desventajas de los materiales compuestos con fibras vegetales

Ventajas	Desventajas
Recursos renovables	Propiedades dependen de condiciones
Biodegradables	Baja adherencia fibra-matriz
Coste de materia prima bajo	Mala resistencia al fuego
Baja energía consumida	Débiles procesos de fabricación
CO ₂ neutral	Absorción de humedad
No residual cuando se incinera	Fibras no técnicas
Buena resistencia a tracción	Puede ser atacado por organismos vivos

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los materiales compuestos con fibras vegetales [12]

En relación con los inconvenientes, se ha valorado como negativo la absorción de agua puesto que haciendo un balance entre los aspectos positivos que pudiera conllevar, como por ejemplo la posible regulación de humedad que podría ser beneficiosos para la industria textil, donde se tiene como objetivo la comodidad y transpirabilidad al absorber humedad del cuerpo, o las propiedades higroscópicas que pueden ayudar a mantener la frescura y calidad de los productos sensibles a la humedad, se valora como más relevante sus aspectos negativos, principalmente de debilitamiento del material que puede perder rigidez, deformarse o limitar su durabilidad y rendimiento. Además, la absorción de humedad también puede conllevar un cambio de estructura dimensional, es decir, al absorber x cantidades de humedades se podrían producir expansiones o contracciones dando lugar a posibles distorsiones, deformaciones o grietas, lo cual también afectaría al aspecto estético de la estructura.

La baja adherencia entre la fibra y la matriz se debe a varios factores, el primero engloba otra desventaja descrita y es la deficiencia que podría ocasionar un mal proceso de fabricación, factores como la temperatura, la presión o la uniformidad en la distribución pueden afectar. También puede ocurrir la diferencia de las propiedades mecánicas observadas entre fibra y matriz, en base a ello, se puede generar una disparidad de transferencia de carga y la adherencia puede verse comprometida.

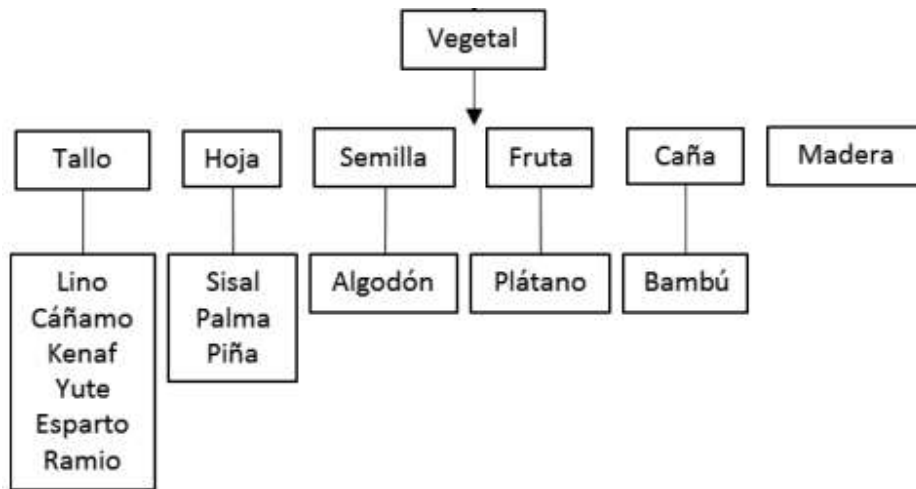
Los materiales compuestos de fibras vegetales también tienen el defecto de tener mala resistencia al fuego, esto es por la naturaleza intrínseca de la fibra vegetal y porque tienden a tener una baja densidad y menor resistencia en comparación a otros materiales que se utilizan en materiales compuestos como las fibras sintéticas [12][13]

5 Fibras vegetales

5.1 Definición

Las fibras vegetales son el principal componente estructural de los tejidos vegetales y se encuentran en diferentes partes de la planta, como el tallo, la hoja, la flor, el fruto y la semilla.[14] Están compuestas principalmente por una matriz de lignina, microfibrillas de celulosa y hemicelulosa.

Dependiendo del origen de la fibra vegetal, se pueden dividir en 6 tipos, las que provienen del tallo, de la hoja, de la semilla, del fruto, de la caña y de la madera. [15]



-Figura 2: Tipos de fibra vegetal [15]

5.2 Producción por año de fibras vegetales

La producción mundial de fibras casi se ha duplicado en los últimos 20 años, de 58 millones de toneladas en 2000 a 109 millones de toneladas en 2020. Aunque todavía no está claro cómo la pandemia y otros factores afectarán al desarrollo futuro, se espera que la producción mundial de fibra aumente otro 34% hasta 146 millones de toneladas en 2030.[16]

Debido a la creciente demanda de fibra vegetal como solución sostenible su producción se ha visto incrementada en porciones significativas. La tabla mostrada a continuación indica la cantidad de fibra vegetal producida cada año. [17]

Tipo de fibra	Producción por año (Millones de toneladas)	Principales países productores
Algodón	25	China, USA, India, Pakistán
Sisal	0.30	Brasil, China, Tanzania, Kenia
Coco	0.45	India, Sri Lanka
Lino	0.50-1.5	China, Francia, Bélgica, Ucrania
Cáñamo	0.10	China
Yute	2.5	India, Bangladesh, China, Brasil

Kenaf	0.45	China, India, Tailandia
Bambú	10	China, India, Tailandia, Vietnam, Brasil
Esparto	0.06	España, Marruecos, Argelia

Tabla 2: Producción anual de fibras vegetales

5.3 Ámbito de aplicación de las fibras vegetales

Existen una serie de ámbitos en la industria donde la fibra vegetal ha repercutido más. A continuación, se muestra un gráfico de las siguientes disciplinas. No obstante, cabe mencionar que hay otros ámbitos no presentes en este gráfico donde también ha influido el uso de fibras vegetales.

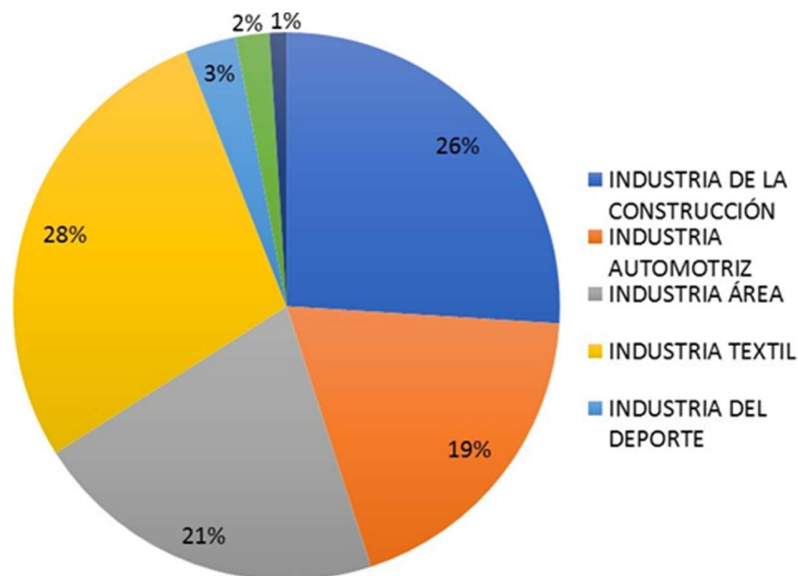


Gráfico 1: Ámbito de aplicaciones de la fibra vegetal [18]

6 Tipos de fibras producidas en Brasil

Con el fin de investigar y poder elegir de una manera adecuada la fibra vegetal utilizada para reforzar un material compuesto de matriz cementicia, se ha escogido una muestra de entre toda la variedad de fibras existentes y de mayor producción en Brasil.

Se estudiarán las siguientes fibras: Fibra de coco, fibra de curauá, fibra de lino, fibra de sisal, fibra de yute, fibra de yute, fibra de algodón y para acabar, la fibra de bambú.

6.1 Fibra de coco

Este tipo de fibra se obtiene de la cáscara de coco y, tradicionalmente, se ha utilizado en la industria textil para fabricar cuerdas, hilos y demás componentes industriales. La fibra de coco se obtiene a partir del mesocarpio del coco, y está compuesta en su mayoría por celulosa, hemicelulosa y lignina, siendo considerada dentro de las fibras duras como el henequén¹. Aproximadamente se extraen unos 125 g de fibra por cada coco usado [19]

Las características mecánicas de este material vienen dadas por la siguiente tabla:[20][21]

Propiedad	Valor
Elasticidad (GPa)	4-6
Resistencia a tracción (Mpa)	131-175
Absorción de humedad (%)	6-8
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	1.5 – 2.5
Deformación a la rotura (%)	15-40
Densidad (g/cm ³)	1.15

Tabla 3: Propiedades mecánicas del coco



-Figura 3: Fibra vegetal de coco [20]

6.2 Fibra de curauá

La fibra de curauá es una fibra vegetal obtenida de las hojas de *Ananas erectifolius*, *Ananas comosus* o *Ananas sativus*. Se considera una de las fibras naturales más resistentes y duraderas. La fibra de curauá tiene alta resistencia a la tracción y buena elasticidad, lo que la hace ideal para su uso en la producción de productos de alta resistencia y larga duración.

Las características mecánicas de la fibra de curauá se muestran en la siguiente tabla:[22][23]

Propiedad	Valor
Elasticidad (Gpa)	3-6
Resistencia a tracción (Mpa)	150.-300
Absorción de humedad (%)	10-12
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	1.3 – 1.7
Deformación a la rotura (%)	3-5
Densidad (g/cm ³)	1.2

Tabla 4: Propiedades mecánicas del curauá



-Figura 4: Fibra vegetal de curauá [65]

6.3 Fibra de lino

El lino es una planta herbácea perteneciente a la familia Linaceae. La fibra de lino se extrae de la parte interna del tallo de la planta y se utiliza en la producción de fibras y papel. La fibra de lino tiene una alta resistencia a la tracción y a la flexión, pero tiene una baja resistencia al impacto en comparación con otras fibras.[24]

Europa se caracteriza por poseer más del 80% del cultivo mundial de lino con áreas de cultivo de alrededor de 125000 hectáreas. Países bajos, Bélgica y Francia lideran la producción. Es en dicho continente en el que se está impulsando de manera notable la sustitución del material compuesto de fibra de lino por la fibra de vidrio. Sin embargo, los resultados no han acabado de dar buenos resultados como cabía esperar, las propiedades mecánicas alcanzadas de resistencia a tracción y módulo de Young se encuentran muy por debajo de lo esperado (110 Mpa y 14 Gpa).

Los componentes principales de la fibra de lino son la hemicelulosa, cera, lignina y pectina, cuyo contenido determina las propiedades mecánicas. Si ocurre alguna variación de las proporciones de los constituyentes se debe a la influencia directa con la especie, edad, variables del cultivo, proceso de extracción y técnica de medición.

Las características mecánicas de la fibra de lino se muestran en la siguiente tabla:[25][26]

Propiedad	Valor
Elasticidad (Gpa)	27.6
Resistencia a tracción (Mpa)	345-1500
Absorción de humedad (%)	10-12
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	34-47
Deformación a la rotura (%)	2.5-4.5
Densidad (g/cm ³)	1.5

Tabla 5:

Propiedades mecánicas del lino



-Figura 5:Fibra vegetal de lino [66]

6.4 Fibra de sisal

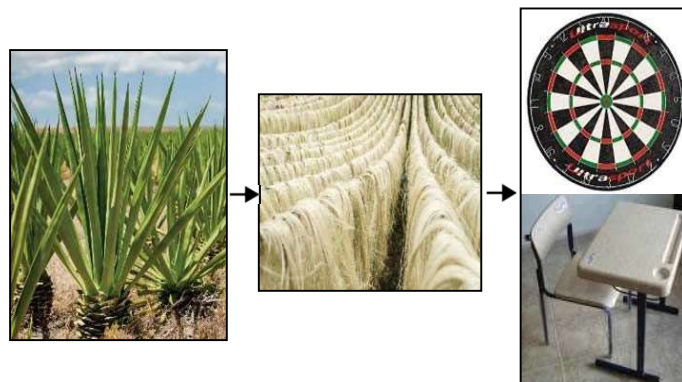
La fibra de sisal se obtiene del *Agave sisalana*, nativo de México. La robusta planta crece bien en una variedad de climas calientes, incluidas zonas secas no utilizables para otros cultivos. El sisal puede cultivarse en casi todos los tipos de suelos, salvo en los que son muy húmedos, salinos o arcillosos, y durante todo el año. Para los agricultores tiene la ventaja de que es resistente a las enfermedades y malas hierbas, y necesita menos insumos que otros cultivos. Su ventaja principal consiste en que crece en climas secos y con escaso riesgo de malas cosechas debidas a la sequía.

A lo largo de su período productivo (entre 7 y 12 años) el sisal produce de 180 a 240 hojas, según el lugar, la altitud, el nivel de las precipitaciones y la variedad. Los mayores productores son México, Angola, Brasil, China, Cuba, Haití, Indonesia, Kenia, Madagascar, Mozambique, Sudáfrica. Tanzania y Tailandia.

Las características mecánicas de la fibra del sisal se muestran en la siguiente tabla:[27]

Propiedad	Valor
Elasticidad (Gpa)	9.4-22
Resistencia a tracción (Mpa)	468-640
Absorción de humedad (%)	10-12
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	3.5 – 5.5
Deformación a la rotura (%)	3-7
Densidad (g/cm ³)	1.45

Tabla 6: Propiedades mecánicas del sisal



-Figura 6: Fibra vegetal de sisal [16]

6.5 Fibra de yute

La fibra del yute se adquiere de las plantas *Corchorus capsularis* y *Corchorus olitorius*, de la familia botánica de las Tiliaceae. El mercado mundial tiene su fuente principal de producción en Pakistán Oriental, aunque la India produce una cantidad equivalente que se destina al consumo interior. Otras naciones como China, Birmania, Brasil, Formosa, Nepal y Sian producen también yute, pero solo en

pequeñas cantidades. En algunas partes del Amazonas sobre todo Brasil se presta climatológicamente para el cultivo.

El rendimiento por hectárea del yute supera a la del lino y el del cáñamo. De 100 kg de yute crudo, según la limpieza de extracción y del cultivo, se podrían usar de 90 a 98 kg de fibra de yute para hilar. Normalmente, a la postre y para su comercio, se embalan paquetes de 180 kg en transporte marítimo.

Durante el período de la Revolución Industrial, el hilo de yute sustituyó por largo tiempo a las fibras de cáñamo y lino en la arpillera. El hilo y los cordeles de yute son también tejidos en cortinas, cubiertas de sillas, tapetes y tapices. Mezclado con otras fibras, es usado en cubiertas de cojines, juguetes, papel de colgadura, pantallas de lámparas y zapatos. Además, el yute cada vez se utiliza más en empaques rígidos y plástico reforzados y está reemplazando a la madera en pulpa y papel.

Las características mecánicas de la fibra de yute se muestran en la siguiente tabla:[25]

Propiedad	Valor
Elasticidad (Gpa)	13-26.5
Resistencia a tracción (Mpa)	393-800
Absorción de humedad (%)	12-16
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	0.5 – 1.5
Deformación a la rotura (%)	13-26.5
Densidad (g/cm ³)	1.3-1.45

Tabla 7: Propiedades mecánicas del yute



-Figura 7: Fibra vegetal de yute [67]

6.6 Fibra de algodón

La fibra vegetal de algodón se refiere a la estructura filamentososa que se encuentra en las semillas maduras de la planta de algodón (*Gossypium hirsutum*), el largo de la fibra varía de 10 a 65 milímetros y el diámetro de 1 a 22 micras.

Su principal producto de la cosecha es la fibra la cual es materia prima para elaborar hilos en las confecciones de prendas de vestir, en colchones. La pepa o semilla es el subproducto del que se pueden obtener aceites y del residuo de la extracción del aceite se obtiene una torta que es rica en proteínas y se puede utilizar para alimentar a la fauna. Además, a partir del aceite crudo se producen aceites comestibles, así como jabones o mantecas vegetales entre otros usos.

Además de su aplicación en la industria textil, la fibra de algodón ha sido objeto de investigación en otros campos. Por ejemplo, en el artículo "Cotton Fiber-Based Materials for Biomedical Applications" publicado en la revista *Advanced Healthcare Materials* [28], se exploran las posibles aplicaciones biomédicas de la fibra de algodón, como en la ingeniería de tejidos, la liberación controlada de fármacos y la curación de heridas.

Las características mecánicas de la fibra del algodón se muestran en la siguiente tabla [28].

Propiedad	Valor
Elasticidad (Gpa)	5.5-12.6
Resistencia a tracción (Mpa)	287-800
Absorción de humedad (%)	7-8
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	1.5 – 3.5
Deformación a la rotura (%)	7-8
Densidad (g/cm ³)	1.2

Tabla 8: Propiedades mecánicas del algodón



-Figura 8: Fibra vegetal de algodón [68]

6.7 Fibra de bambú

La fibra de bambú se trata de una planta herbácea de caña de azúcar con alrededor de 1250 especies bajo su nombre. Una de sus particularidades es que puede crecer hasta 0,2 metros por día, según el tipo y el tipo de planta. Su tasa de crecimiento ha establecido un récord de casi 1 millón por día. En solo seis meses, las plantas alcanzaron su altura máxima (18-30m). A diferencia de la madera (15-25 años), alcanza la edad de construcción a los cuatro años.

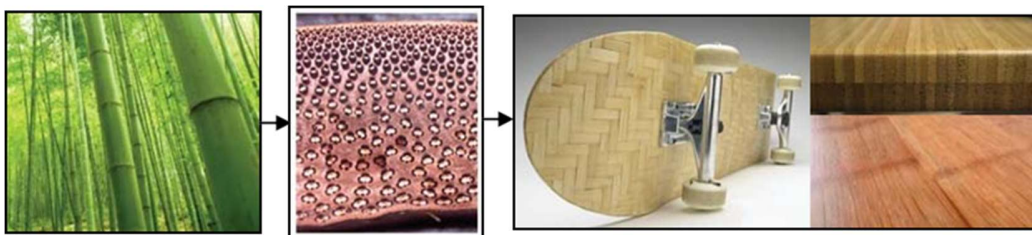
Se cultiva en muchas partes de Asia, América del Sur y África con una producción anual de 10 millones de toneladas. La baja densidad de grano y sus buenas propiedades mecánicas le confieren un coeficiente muy elevado. Los rendimientos dependen del clima, el año de madurez, el cultivo, el método de cultivo, los tratamientos químicos, la mano de obra y los límites del área. Los costes de producción varían (0,2 -1) [€/metro lineal de caña] dependiendo del diámetro de caña, espesor de pared, orientación y tratamiento químico. [29] El precio en Europa ha aumentado 10 veces debido al envío. Ampliamente utilizado en construcción, pisos, muebles, equipos deportivos y otros campos.

Las características mecánicas de la fibra de bambú se muestran en la siguiente tabla:[25]

Propiedad	Valor
Elasticidad (GPa)	3-6
Resistencia a tracción (Mpa)	150.-300
Absorción de humedad (%)	8-10
Dureza Brinell (Kg/mm ²)	4.5 – 6.5
Deformación a la rotura (%)	3-5
Densidad (g/cm ³)	1.2

Tabla 9: Propiedades mecánicas del bambú

- Se puede observar la dispersión que hay entre los valores de una misma fibra, en muchos casos se debe a su procedencia, forma de obtención, entre otros tipos de condicionantes.



-Figura 9: Fibra vegetal de bambú [29]

6.8 Ejemplos prácticos de FCRM

A modo de clarificar y aclarar de forma más práctica, se han citado algunos de los ejemplos en donde los compuestos de matrices cementíceas han formado parte de refuerzos en estructuras.

Una de las aplicaciones potenciales de los elementos estructurales se ha centrado en el refuerzo de columnas de matriz cementosa [31] [32]. Se evaluaron columnas de hormigón reforzadas con fibras de coco encofradas con tubos de polímero reforzados con tejido bidireccional de lino. El resultado fue un incremento de la carga máxima del 36,5% en los ensayos a flexión.

Tomando de referencias los estudios en las columnas de matriz cementosa, se diseñaron prototipos aplicados en entornos cotidianos, como el elemento tipo columna de hormigón armado reforzado con un 0.8% de fibras de coco y sisal, desarrollado por Bragança et al. [33], que ha sido utilizado para sustentar cables de distribución de corriente eléctrica, demostrando una alta resistencia al impacto debido a la capacidad de absorción de energía proporcionada por el refuerzo.

Otros estudios se han centrado en la durabilidad de las fibras cortas como refuerzo interno en vigas. Por ejemplo, Ramakrishna y Sundararajan [34] investigaron la durabilidad de las fibras de coco, sisal y yute como refuerzo, y encontraron que con el tiempo hubo una disminución en la resistencia a la compresión y tracción de los compuestos reforzados.

Asimismo, otra de las áreas en la que se ha observado un notable avance y se ha llevado a cabo una mayor cantidad de investigaciones es en la producción de tejas para cubiertas. Desde la década de 1970, se realizaron los primeros estudios sobre el uso de fibras vegetales como refuerzo estructural en la fabricación de techos, ya que presentaban un costo más accesible y una mayor calidad y durabilidad en comparación con los techos fabricados de manera tradicional [35]. Desde entonces, se han realizado mejoras y optimizaciones continuas en la composición y los procesos de fabricación de estas tejas [35][36][37].

7 Métodos para evitar la degradación de la fibra

7.1 Tratamientos principales

La implementación de fibras vegetales como refuerzo en compuestos de matriz cementosa está sujeta a limitaciones debido a la durabilidad a largo plazo de estos materiales. Esta durabilidad se encuentra estrechamente relacionada con las estructuras y propiedades de las fibras [38]. Los compuestos cementosos se caracterizan por poseer una matriz porosa con alta alcalinidad, lo cual constituye una de las principales causas de la falta de durabilidad de las pastas de cemento. La alta alcalinidad favorece la formación de grietas, lo que resulta en una disminución de la resistencia y tenacidad de los compuestos cementosos [39]. El ambiente altamente alcalino mineraliza y degrada las fibras vegetales que se encuentran inmersas en la pasta cementicia ya que disuelve las fases de lignina y hemicelulosa, debilitando la estructura de las fibras [40].

Existen diversos tratamientos y se pueden clasificar según la metodología empleada en tratamientos físicos o en tratamientos químicos.[41]

Los tratamientos físicos brindan la oportunidad de modificar las propiedades estructurales y superficiales de las fibras naturales, lo que a su vez mejora la adherencia mecánica con la matriz. Estos tratamientos incluyen procesos como el estiramiento, calandrado y la producción de hilos híbridos, sin ocasionar un impacto significativo en las propiedades químicas de las fibras.[39]

En este tipo de tratamientos encontramos los tratamientos con plasma y los tratamientos corona.

Con respecto a los tratamientos químicos son ampliamente utilizados en el procesamiento de fibras naturales debido a su capacidad para reducir la polaridad de las fibras y hacerlas menos hidrofílicas [40]. Estos tratamientos implican la modificación de las propiedades químicas de las fibras a través de reacciones ácido-base en la interfaz, la alteración de la energía superficial y la manipulación de los fenómenos de humectación [39].

Se pueden dividir en cuatro tratamientos principales: Los tratamientos alcalinos, la acetilación, los tratamientos con silano y los tratamientos de descomposición térmica.

No obstante, los tratamientos más comunes para alterar mejorar la durabilidad y propiedades mecánicas de los FCRM son la alcalinización, silanización, hornificación, adiciones puzolánicas y carbonatación acelerada.

7.2 Ejemplo práctico

Según un estudio realizado por Olga Jaume Rodríguez en su trabajo final de grado titulado: *Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras* [42] se sometieron ciertas fibras vegetales a un examen de tracción impregnadas con resina y poliéster.

En dicho estudio se aplicó la resina MasterBrace P 3500 y una resina biológica llamada SuperSap ONE dado que éstas son adecuadas para el uso sobre soportes de hormigón, acero y mampostería. Como resultado, se obtuvo una mejor rigidez en las mallas investigadas puesto que se aumentó el módulo elástico del compuesto. También se denotó que ambas resinas influyen de igual manera en las propiedades mecánicas de las fibras vegetales.

Asimismo, Olga Jaume apuntó que la utilización de estas dos resinas sería adecuada para estructuras que necesiten un aporte extra de rigidez, como para vigas de hormigón armado en que su flecha sea grande y precisen aumentar su capacidad de servicio.

Con respecto al poliéster, se observó que éstas proporcionaron mayores deformaciones en las mallas por lo que sería correcto aplicarse en especímenes que se sometan a una carga cíclica y se haya de disipar energía en la estructura.

8 Elección de la fibra vegetal

Debido a su alta producción y repercusión que posee la fibra vegetal de sisal en Brasil, siendo la responsable de una parte significativa de la economía, se ha elegido esta fibra vegetal como objeto de estudio para el proyecto.

Además, con la investigación de este tipo de fibra, fomentaremos el desarrollo de la industria local del país y con ello, se contribuirá a la reducción de la dependencia de materiales importados en la industria de la construcción.

A continuación, se verá cómo ha afectado al desarrollo del comercio dicha fibra en el país, sus propiedades mecánicas en base a investigaciones realizadas y las contribuciones realizadas en el ámbito de la construcción.

8.1 Contextualización de la fibra vegetal de sisal

La fibra vegetal de sisal es una fibra relativamente joven debido a que no se utilizó hasta finales del siglo XIX, aunque cuando cogió más relevancia fue a principios del siglo XX. Esta planta se cultiva en climas tropicales y subtropicales donde existe ambiente caluroso prácticamente todo el año.



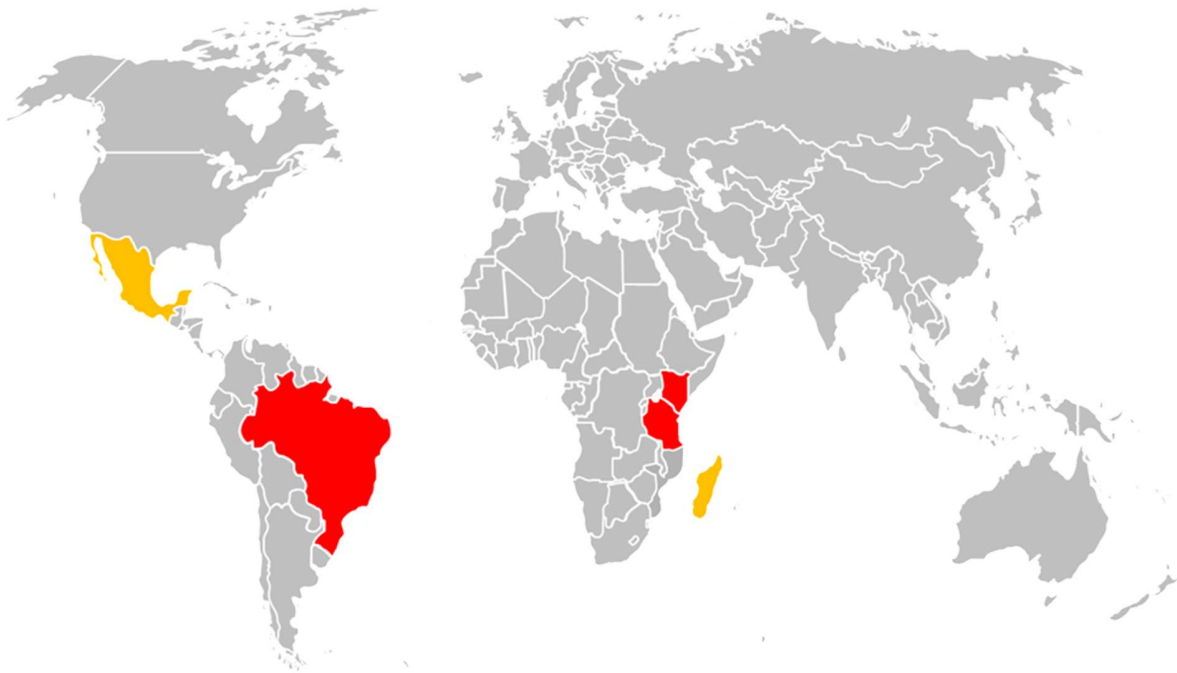
-Figura 10: Planta de sisal [69]

Desde Brasil, el sisal se exporta principalmente a Estados Unidos, Canadá, Europa, Irán y países del Este Europeo. China y México son los principales compradores de esta fibra virgen.

África Oriental también tiene una importancia elevada en la producción de sisal, no obstante, fue debido a un traslado de la planta realizado por el Dr. Hindorf en 1893 que, a partir de una serie de plantas madre creó la hoy conocida industria de sisal de África Oriental. Las fibras de sisal también se cultivaron en Indonesia hasta mediados de la década de 1960 y, en Angola, hasta la década de 1970.[43]

A principios de la década de 1970, la producción anual de sisal y cáñamo negro seguía siendo de unas 800 000 toneladas, pero se había reducido a 200 000 toneladas a finales del milenio. Más recientemente, el uso de sisal también ha aumentado debido a las nuevas aplicaciones y al aumento del costo del queroseno como base para las fibras sintéticas.

Actualmente, la producción mundial de sisal y de una fibra de *agave* similar, el henequén, está estimada en alrededor de 300.000 toneladas, valoradas en 75 millones de dólares. Los mayores productores son Brasil (120.000 toneladas), Tanzania (30.000) y Kenia (25.000). Brasil exporta alrededor de 100.000 toneladas. Kenia exporta cerca de 20.000 toneladas y Tanzania 15.000 toneladas. [44]



-Figura 11: Países con más producción de sisal [44]

8.2 Historia del sisal en Brasil

La mayoría de la producción de sisal en Brasil se ubica en una región del nordeste, concretamente en el estado de Bahía que es el responsable de casi el 50% de la producción mundial de esta fibra natural.

El sisal ganó importancia económica en Brasil después de la década de 1930. El cultivo y la producción de sisal transformaron socioeconómicamente los espacios rurales brasileños, generando riqueza, asentando poblaciones, desarrollando la economía local... El sisal creó una “nueva civilización” en áreas donde, antes, solo reinaba la desesperanza y la desolación. En Bahía, el sisal fue considerado la “planta de redención” al haber recuperado económica y socialmente un vasto territorio que vivía en la extrema miseria, con sus habitantes arrebatados por la pobreza y periódicamente sometidos al éxodo rural.



El cultivo del sisal alcanzó su apogeo en Bahía entre 1938 y 1969, siendo promovido especialmente por el Gobierno de Landulpho Alves y por las condiciones propicias del mercado mundial. En 1940, el Gobierno de Bahía inició un proyecto de 12 millones de plantones de sisal, aunque tan solo 2 millones fueron finalmente plantados. En ese contexto de crecimiento, el sisal fue ampliándose por todo el nordeste de Bahía, hasta el punto de que, desde ese momento, la zona pasó a llamarse “Región do Sisal”, Sisalândia y, más recientemente, “Territorio do Sisal”. A finales de la década de 1940 comenzó la exportación de sisal, con un 96% de la producción destinada al mercado exterior. En consecuencia, las zonas del interior de Bahía pudieron, por primera vez en su historia, tener unas condiciones mínimas y efectivas de integración en los mercados locales, nacionales e internacionales.

En 1950, Brasil ya se posicionaba en una destacada situación con respecto a la producción mundial de sisal. Durante esa etapa, en base a las nuevas políticas brasileñas para promover la exportación de esta fibra vegetal y la introducción en el sector del sisal de procesos mecanizados de trituración. La década de 1960 se presentó como una de las más provechosas para el cultivo del sisal en Bahía, dando lugar a un crecimiento entre los agricultores de los diversos sectores del nordeste de Brasil. El sisal fue considerado y nombrado como el “oro verde” de las tierras del interior de la región nordestina debido al alto precio con el que fluctuaba en el mercado internacional. Más tarde, el sisal alcanzaría su pico productivo a nivel mundial. En Bahía, entre 1946- 1973, la producción de sisal pasó de 234 toneladas por año a 133.992 toneladas por año, convirtiéndose en una incuestionable fuente de riqueza para las poblaciones más pobres del campo bahiano.

A partir de 1975, la producción, venta y exportación del sisal entra en crisis, reduciéndose su producción (hasta 1997) en casi un 60%. Esta disminución se produjo como consecuencia de la entrada en el mercado de los sustitutivos semisintéticos y sintéticos, pero también de la competencia del sisal africano, de la oferta excesiva de sisal en Bahía respecto a la demanda, y del cierre de las fábricas europeas que manejaban la fibra de sisal como materia prima.

Actualmente el cultivo del sisal tiene una extensión plantada de 154 mil hectáreas en el país, con una productividad cercana a los 800 kilos por hectárea. [45]

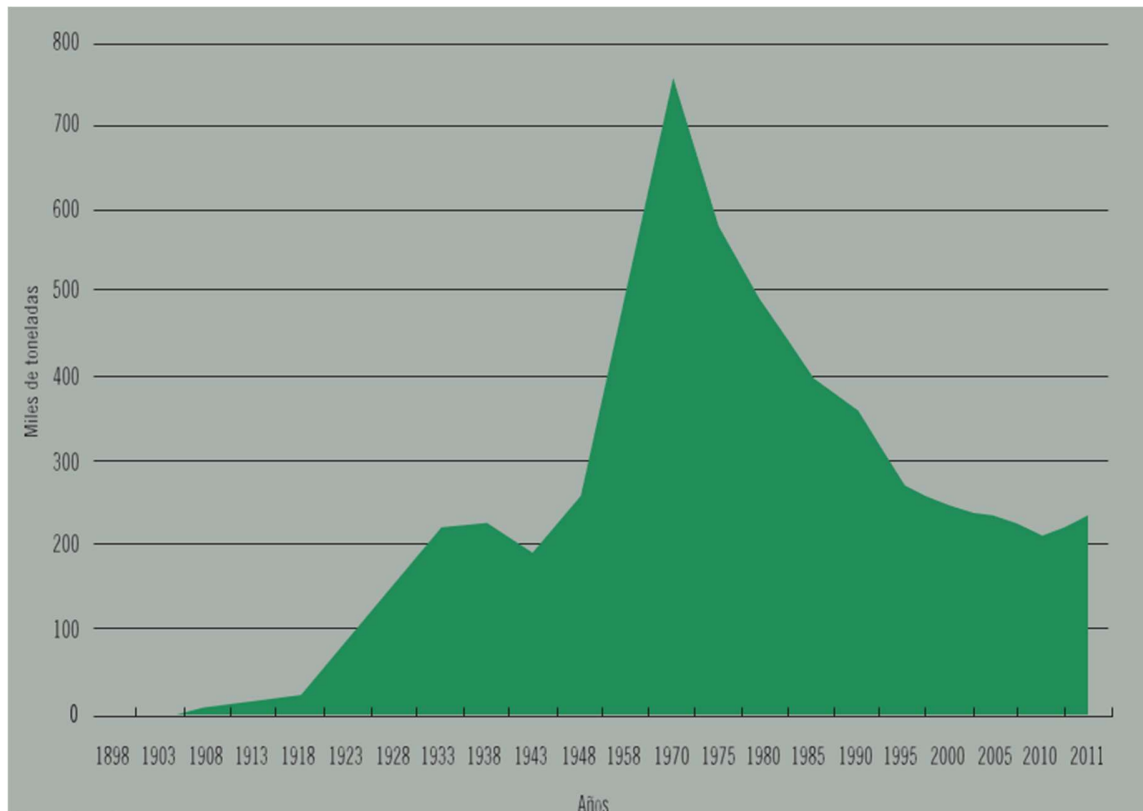


Gráfico 2: Producción mundial de sisal (1898-2011) [45]

8.3 Características y método de extracción en Bahía

El sisal es una planta semixerofítica originaria de la península de Yucatán (México) que crece principalmente en las zonas tropicales y subtropicales y es resistente a sequías prolongadas y altas temperaturas. Pertenece al género *Agave*, que define un grupo bien definido de plantas que pueden alcanzar una altura de 12 metros o más. En el mundo, la variedad de agave sisal es la variedad más plantada. En una región de Brasil, Bahía, el cultivo del sisal es extensivo y los métodos utilizados son rudimentarios.

La preparación de la tierra es manual, sin mecanización, fertilizantes y servicios de cultivo. Al sisal le gustan los suelos silíceos, arcillosos, sueltos y profundos, ricos en cal. La densidad de siembra puede ser de hilera sencilla (2m x 1m) o hilera doble (3m x 1m) dependiendo del tipo de consorcio adoptado con bovinos, cabras y ovejas o maíz, frijol, yuca, etc. El corte y la siembra del sisal se realiza sin maquinaria y es una de las etapas más importantes de la cosecha. [46]

El primer corte de sisal se realiza a partir del tercer año de vida. La edad promedio de las plantas es de 12 años. Las láminas de sisal se aplican directamente al tronco, proporcionando 50-70 láminas (90-120 cm) para cortar. El corte se realiza manualmente con hoz/cuchillo, al ras del tronco. El transporte del papel triturado al sitio de trituración generalmente lo realizan burros con 200 hojas de

sisal por viaje. Para llegar a la "etapa de fibra", las hojas de sisal pasan por un proceso de transformación básico pero complejo. La trituración (procesamiento) de las hojuelas de sisal se realiza con un "raspador" adaptado a un pequeño motor con una capacidad de hasta 300 kg/día. Hoy, el "motor de sisal" sigue siendo la trituradora principal en los campos de sisal de Bahía. La operación de trituración tiene una capacidad operativa baja (150-200) kg de fibra seca en 10 horas de trabajo), una producción residual alta (en promedio solo el 25% de la fibra es contenida por 8 trabajadores), lo que aumenta los costos de producción. Luego, las fibras se transportan a un fregadero lleno de agua limpia y se dejan en remojo durante la noche (8 a 12 horas) para su limpieza. Posteriormente, se deben secar al sol durante 8 a 10 horas. Luego, las fibras se transportan a la ciudad ("batedeiras") donde se sacuden, nivelan, clasifican y animan según su categoría (por longitud) y tipo (calidad, grado de madurez, color, brillo, suavidad, limpieza, humedad).

Finalmente, las fibras (fardos) se envían a industrias productoras de alambres de prensado (cuerdas, cables, tranvías, etc.), alambres de atar (cuerdas agrícolas), alfombras, etc. Además, las fibras de sisal también se pueden utilizar de otras formas, como casquillos (no solo para hacer papel, también se utilizan para decoración), caldo (en forma de melaza para la producción de pectina, saponinas, alcohol industrial, piensos, etc.) y escoria de caña de azúcar (también utilizada para la producción de papel). Las fibras de sisal también se utilizan en la producción de cables marinos, prendas de vestir, calzado, artesanías, tapicería y revestimientos para automóviles, entre otros.[44]



-Figura 12: Secando sisal en Bahía [70]

8.4 Comparación de las propiedades con otras fibras

En base a los diferentes tipos de fibra vegetal estudiados, se ha realizado una comparativa en forma de tabla con las propiedades analizadas en anterioridad:

		Tipo de fibra						
		Coco	Curauá	Lino	Sisal	Yute	Algodón	Bambú
Propiedad	Elasticidad (GPa)	4-6	3-6	27.6	9.4-22	13-26.5	5.5-12.6	3-6
	Resistencia a tracción (Mpa)	131-175	150.-300	345-1500	468-640	393-800	287-800	150.-300
	Absorción de humedad (%)	6-8	10-12	10-12	10-12	12-16	7-8	8-10
	Dureza Brinell (Kg/mm ²)	1.5 – 2.5	1.3 – 1.7	34-47	3.5 – 5.5	0.5 – 1.5	1.5 – 3.5	4.5 – 6.5
	Deformación a la rotura (%)	15-40	3-5	2.5-4.5	3-7	13-26.5	7-8	3-5
	Densidad (g/cm ³)	1.15	1.2	1.5	1.45	1.3-1.45	1.2	1.2

Tabla 10: Propiedades mecánicas de las fibras vegetales

Cabe destacar que estos valores dependen de la experimentación usada, del tratamiento realizado, así como también de múltiples condiciones a las que estas sujetas las fibras a la hora de ensayarse. No obstante, podemos concluir que el sisal presenta una excelente absorción a la humedad y que dicha característica puede resultar una ventaja o un inconveniente según el uso que hagamos de ella (véase 4.3). Además, se puede deducir que tiende a ser un material con un módulo elástico alto y posee una buena resistencia a la tracción.

8.5 Residuos del sisal

Como hemos podido apreciar a lo largo del trabajo, la fibra vegetal de sisal es un importante producto agrícola utilizado diversos campos industriales. No obstante, durante el proceso de producción de la fibra se genera una gran cantidad de residuos que actualmente tienen un bajo potencial de uso comercial.

En el caso de la fibra de sisal, tras el decorticado (Figura 12a) sólo se aprovecha aproximadamente el 5% de toda la hoja de sisal, quedando el 95% restante como residuo, que se separa en un tamiz giratorio (Figura 12b) en dos tipos: i) residuos de hoja que pueden utilizarse para generar bioenergía, piensos y fertilizantes o que se acumulan en las proximidades de ríos y arroyos, y ii) matorral de

campo que está compuesto por fibra corta de sisal y que actualmente no tiene ninguna aplicación. Durante el proceso de secado (Figura 12c), las fibras de sisal se seleccionan visualmente; las fibras que no presentan daños ni impurezas se cepillan y envasan para su exportación o se utilizan como materia prima para productos a base de sisal. Las demás fibras, denominadas refugo, se utilizan en la industria de la construcción como subproductos en la instalación de enlucidos para techos.



-Figura 13: Decortico del sisal [47]

En el estudio titulado *Caracterização e tratamento de resíduos de fibra de sisal para uso em compósitos à base de cimento* [47] (Caracterización y tratamiento de residuos de fibra de sisal para su aplicación en compuestos a base de cemento), se estudió la viabilidad de añadir dichos residuos, denominados mata de campo y refugo, y verificar la potencialidad de su uso en el refuerzo de composites de base cementosa.

Se evaluaron los residuos con tratamiento y sin él y las conclusiones fueron las siguientes:

Los residuos de fibras de sisal, tienen un diámetro menor y una resistencia mecánica inferior a la de las fibras de sisal. A diferencia de la fibra de sisal, en los residuos de sisal se observan agujeros y roturas de la pared lateral de la fibra.

La resistencia al cizallamiento interfacial entre las fibras tratadas y la matriz a base de cemento fue significativamente superior a la de las no tratadas.

El comportamiento post-pico y la tenacidad del compuesto de base cementícea reforzado con refugo y sometido a 10 ciclos de tratamiento aumentaron debido a la mejora de la unión interfacial entre la fibra y la matriz, dando como resultado un compuesto con mejor comportamiento a flexión que el compuesto reforzado con fibra de sisal sin tratar.

Los resultados indican que el uso de residuos tratados permite la producción de compuestos con buenas propiedades mecánicas superiores a los composites tradicionales reforzados con fibras naturales de sisal.

9 Comportamiento mecánico del FCRM

Existen múltiples investigaciones y experimentaciones con el fin de observar las propiedades mecánicas FCRM de sisal [48][49][50][51], sin embargo (y por temas de extensión), me he basado principalmente en los estudios publicados por Luis Mercedes, Luis Gil y Ernest Bernat en su artículo Comportamiento mecánico de los materiales compuestos de matriz cementicia reforzada con tejido vegetal (FCRM) publicado en la revista "Construction and Building" [52]. No obstante, también he

querido añadir datos de otras investigaciones para poder revisar diferentes tipos de experimentación e investigación.

9.1 Luis Mercedes, Luis Gil y Ernest Bernat [52]

El objetivo de esta investigación era presentar compuestos innovadores y sostenibles de matriz cementosa y fibras vegetales como alternativa para reforzar estructuras, mediante el uso de una mayor cantidad de fibras.

Para ello, se usaron mallas de diversas fibras vegetales (cáñamo, lino, sisal y algodón) impregnadas con resina epoxi y se observaron los resultados de la experimentación realizada. Sin embargo, en el estudio tan sólo se han obtenido los resultados del sisal puesto que la investigación se ha centrado en este tipo de fibra.

9.1.1 Materiales utilizados

Para la preparación de las probetas se utilizó un mortero tixotrópico monocomponente a base de cemento y resinas sintéticas, incluyendo humo de sílice y reforzado con fibras de poliamida. Este mortero cumple los requisitos del tipo R3 definidos en la norma UNE-EN 1504-3 [53].

Para más detalle en relación al método experimental véase el anexo.

Las propiedades del mortero vienen dadas por la siguiente tabla:

Composición química	Mortero de cemento preparado, mejorado con resinas sintéticas y humo de sílice, y reforzado con fibras de poliamida
Densidad del mortero fresco:	2.1 kg/l (a + 20°C).
Granulometría:	0–2 mm
Resistencia a la compresión (2):	39.25 MPa
Resistencia a la flexión (2):	6.56 MPa
Resistencia a la tracción(2):	2.9 MPa
(2) Resultados del test (EN 1015-11: 2000 [54])	

9.1.2 Resultados y conclusiones

Del mencionado artículo se demostraron los siguientes resultados y conclusiones acerca de las fibras de sisal y de los FCRM.

Propiedades	Sisal
Densidad lineal hilo +epoxi (g/m)	8.14
Epoxi/ longitud de hilo (g/m)	4.51

Área epoxi/malla (g/cm ²)	0.03
Peso malla + epoxi/área (g/cm ²)	0.217
Densidad lineal hilo + poliéster (g/m)	9.36
Poliéster/longitud de hilo (g/m)	5.73
Área poliéster/malla (g/cm ²)	0.04
Peso malla + poliéster/área de la malla(g/cm ²)	0.25

Tabla 11: Propiedades de los hilos y cuantificación de resina aplicada

Propiedades mecánicas de los hilos			
Hilos	Sin resina	Con epoxi	Con poliéster
Fibra	Sisal	Sisal	Sisal
Número de ensayos	5	5	5
F _{Yarn} (N)	475.20	546.80	453.00
σ _{Yarn} (MPa)	96.86	111.45	92.33
(C.V)	(9%)	(8%)	(12%)
ε _{Yarn} (%)	3.01	2.15	2.61
(C.V)	(11%)	(8%)	(5%)
E _{Yarn} (GPa)	3.75	4.87	3.78
(C.V)	(6%)	(12%)	(8%)
(C.V) = coeficiente de variación, F _{Yarn} = carga máxima media, σ _{Yarn} = resistencia a la tracción media, ε _{Yarn} = deformación pico media, E _{Yarn} = módulo de Young medio.			

Tabla 12: Propiedades mecánicas de los hilos

Propiedades mecánicas de los FCRM			
		Malla con epoxi	Malla con poliéster
FCRM	Mortero sin malla	Sisal	Sisal
Número de ensayos	3	3	3
Área ensayada	-	39.25	39.25
σ_{mc}	4.61	3.88	2.17
(MPa)	(11%)	(10%)	(5%)
F_u	2303	3697	1684
(N)	(11%)	(8%)	(36%)
σ_{Mesh}	-	94.18	42.9
(MPa)		(8%)	(36%)
$\sigma_{Mesh}/\sigma_{Yarn}$ (%)	-	84.51	46.46
E_I	8.92	16,74	8.7
(GPa)	(40%)	(60%)	-
E_{II}	-	18.34	2.29
(GPa)		(19%)	(33%)
E_{III}	-	2.04	1.66
(GPa)		(31%)	(33%)
$\Delta E/E_{yarn}$ (%)	-	58.11	56.08

Tabla 13: Propiedades mecánicas de los FCRM

Así pues, de los resultados obtenidos se elaboraron las siguientes conclusiones:

-La influencia del revestimiento de resina en las propiedades mecánicas de los hilos de diferentes materiales dependía principalmente de la capacidad de la resina para penetrar en su estructura interna. Esto tenía especial importancia para los hilos recubiertos con poliéster, ya que esta resina tenía menor fluidez que la resina epoxi.

- El FRCM con malla recubierta de resina epoxi muestra un mayor porcentaje de aprovechamiento de los hilos que el FRCM con malla recubierta de poliéster. Esto demuestra que la resina epoxi tiene mejor compatibilidad con la matriz del mortero que el poliéster.

- La carga máxima media de los FCRM de sisal aumentó significativamente en comparación con el FCRM sin reforzar

- Las tensiones y el fallo por fisuración múltiple alcanzados por el FRCM de fibra vegetal sugieren que el FRCM de fibra vegetal puede alcanzar propiedades mecánicas comparables a (o incluso superiores) a las de los materiales de fibra sintética.

9.2 Investigación en la fatiga

También se han efectuado estudios para comprobar la resistencia a la fatiga de los FCRM de sisal y, en base a la experimentación de título *Comportamiento a la fatiga de los compuestos de cemento reforzados con fibras de sisal* [55], se concluyeron las siguientes afirmaciones:

- Los materiales compuestos no se fatigaron hasta 106 ciclos cuando se sometieron a nivel de tensión máximo inferior a 6 MPa (50% de la resistencia a tracción máxima). Por encima de esta tensión, los composites presentaron fatiga por debajo de 103 ciclos.

- Los materiales compuestos que sobrevivieron a 106 ciclos y se ensayaron bajo tensión monotónica no mostraron una reducción significativa de la resistencia a la tracción máxima pero sí una disminución del módulo de Young. La resistencia a la primera fisura aumentó al aumentar los niveles de fatiga.

En base a las imágenes de alto contraste de las fisuras, las fibras de sisal fueron capaces de detener las grietas incluso cuando se sometieron a 106 ciclos a 6 MPa (50%) de tensión máxima.

9.3 Mejora de la durabilidad del FCRM de sisal

En base a los estudios realizados en el punto 7 (*Métodos para evitar la degradación de la fibra*), se introdujo la potencial problemática de los materiales compuestos de matriz cementicia, en el estudio *Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability* (Desarrollo de materiales compuestos de fibra vegetal y mortero de mayor durabilidad) [56], se introdujo la capacidad del humo de sílice para reducir la fragilización a largo plazo de los FCRM reforzados con fibra vegetal de sisal. En dicha investigación, se incorporó este material antes de realizar la mezcla y las propiedades a largo plazo de las probetas tratadas eran muy similares a las de las probetas de control no tratadas durante 28 días, lo que supone un gran avance en los problemas de durabilidad que presentan este tipo de compuestos a la hora de usarse.

Asimismo, en el estudio realizado por Gram, también se usó el humo de sílice para reforzar la matriz y prevenir al compuesto de ataques alcalinos. Se demostró que al cabo de 4 años los compuestos mantenían buena parte de su resistencia [57].



-Figura 14: Humo de sílice para hormigón [71]

Otro método para evitar la degradación y con ello, mejorar la durabilidad de la fibra es usando una matriz libre de hidróxido de calcio (CH).

En el estudio titulado *Durabilidad de laminados de mortero reforzado con fibra de sisal moldeados por compresión* [58], se hizo hincapié en esa idea al experimentar substituyendo el cemento Portland por arcilla calcinada (metacolin y residuos calcinados) y obteniendo una matriz totalmente exenta de hidróxido de calcio.

Los resultados fueron que el uso de un 50% de arcilla calcinada como sustituto parcial del cemento Portland dio lugar a un aumento de la resistencia a la fragilización a largo plazo que favoreció al entorno del refuerzo de sisal.

Las probetas de los composites libres de CH sometidas hasta 100 ciclos de humectación y secado presentaron una resistencia a la rotura y una tenacidad a la flexión tan elevadas como las probetas de referencia. La formación de multifisuras observada en las probetas durante los ensayos de flexión, la gran longitud de fibras arrancadas en la superficie de fractura de las probetas ensayadas y el análisis microestructural indicaron que las fibras de sisal no sufrieron ningún proceso de mineralización cuando fueron utilizadas como refuerzo en la matriz libre de CH. Sin embargo, se observó una mineralización completa cuando las fibras se utilizaron como refuerzo en los compuestos de cemento Portland. Por lo tanto, el uso de una matriz sin hidróxido de calcio parece ser una alternativa prometedora para aumentar la durabilidad de los de los materiales compuestos a base de fibras de sisal y cemento.



-Figura 15: Hidróxido de calcio [72]

10 Aplicaciones en la construcción

10.1 Estructuras de mampostería

Actualmente la aplicación de fibras vegetales en estructuras de mampostería sigue siendo un reto para los científicos que pretenden estudiar más a fondo las propiedades y ventajas de este tipo de compuestos.

En el artículo de Olivito, R. S., Cevallos, O. A. y Carrozzini, A, titulado *Desarrollo de compuestos cementosos duraderos utilizando tejidos de sisal y lino para el refuerzo de estructuras de mampostería [987]*, se pretende desarrollar materiales compuestos sostenibles utilizando matrices cementosas reforzadas con tejidos bidireccionales no tratados de fibras naturales, concretamente, fibras de lino y sisal.

Las matrices utilizadas para estudiar la durabilidad de las fibras fueron una mezcla de mortero a base de cal hidráulica natural (NLM) con un bajo contenido de sales solubles en agua y una mezcla de lechada a base de cal (NLG) que contiene puzolanas naturales y carbonatado.

Al finalizar la experimentación concluyeron que los compuestos cementosos reforzados con fibras naturales representan materiales sostenibles para la industria de la construcción, y la capacidad de reciclaje de estos materiales podría ofrecer nuevas oportunidades para que los países en desarrollo generen recursos energéticos y económicos.

Además, afirmaron que tanto las tiras de tejido de lino como las de sisal presentaban propiedades de tracción similares, pero los tejidos de lino mostraban una resistencia a la tracción ligeramente superior, con lo que proporcionaban un buen indicio del potencial de alto rendimiento de estos tejidos en aplicaciones de compuestos reforzados con fibras.

La menor alcalinidad de la matriz NLG y la presencia de cargas de carbonato y puzolana pura con un alto contenido de sílice reactiva hacen que esta matriz sea potencialmente adecuada para su incorporación en compuestos de refuerzo de fibras vegetales para reforzar mampostería.

Los sistemas de compuestos FCRM investigados en el estudio demostraron un comportamiento dúctil y una resistencia a la tracción moderada. El comportamiento a tracción de los compuestos FCRM reforzados con tiras de tejido de sisal y lino podría mejorarse con mayores fracciones de volumen de fibra.

10.2 Paneles sándwich

Una de las múltiples aplicaciones del sisal es en los denominados paneles sándwich. Estas estructuras se componen de dos capas externas y un núcleo que presenta propiedades aislantes térmicas y/o acústicas. El desarrollo de paneles sándwich prefabricados de hormigón ha ido ganando fuerza en la industria debido a su eficiencia estructural y térmica que presenta este tipo de tecnología.

En el estudio llamado *Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete* (Desarrollo de paneles sándwich combinando Fibra de Sisal-Cemento y hormigón ligero reforzado con fibras) [60], se desarrolló un innovador panel sándwich estructural y térmicamente eficiente formado por dos laminados exteriores de compuesto de fibrocemento de sisal (SiFCC).

Para la fabricación de los paneles se elaboraron dos maneras distintas, una fabricada a partir de fibras largas de sisal (longitud de 700 mm) y otra a partir de fibras cortas (50 mm). Como resultado las fibras largas de sisal fueron más eficaces en cuanto al aumento de la resistencia a la flexión y a la tracción como también con respecto a la absorción de energía en comparación a las fibras cortas de sisal, mostrando un mayor número de grietas y menor espaciado entre ellas.

La alta resistencia a la tracción del compuesto de cemento y fibra de sisal largo, junto con su buena adherencia al núcleo dio lugar a un panel sándwich con una capacidad de cizallamiento adecuada, una mayor ductilidad y mayor capacidad de flexión en comparación con los laminados de fibras cortas de sisal lo que representa un gran avance en relación al sisal en el uso de paneles sándwich.

10.3 Escayola

Otra de las posibles aplicaciones y utilizadas en las construcciones de bajo coste es en el yeso.

El yeso posee una amplia variedad de aplicaciones en el ámbito de la construcción, desde revestimientos hasta la creación de elementos prefabricados. Por otro lado, en muchos países en vías de desarrollo, el uso del yeso y la escayola es limitado a pesar de contar con reservas de mineral de yeso. Estas reservas podrían ser explotadas y transformadas en materiales y componentes constructivos con inversiones comparativamente menores a otros materiales de mayor demanda en la construcción de viviendas.

Según el estudio llevado a cabo por Ignacio de Oteiz a San José y titulado *estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste* [61], se ponen de relieve diferentes aspectos subrayando el peso que podría tener este tipo de material en la construcción de viviendas, tales como:

-El yeso y la escayola son materiales que pueden sustituir al cemento en partidas de obra importantes de la vivienda y su coste es menor que el del cemento (alrededor del 50% según las zonas).

-Las características y prestaciones del yeso y la escayola en términos de habitabilidad, como el confort higrotérmico, resistencia al fuego, aislamiento térmico y acústico, entre otros, son factores significativos que mejoran la calidad de las viviendas.

-Debido a su facilidad de moldeado y su peso reducido, estos materiales permiten la prefabricación de componentes constructivos que se pueden utilizar en el desarrollo de viviendas, tanto en procesos industrializados como en autoconstrucción

A continuación, se elaboraron diferentes métodos experimentales analizando la viabilidad de este tipo de compuestos y se llegó a las siguientes conclusiones:

El comportamiento del compuesto cambia de manera significativa cuando se añaden fibras cortas de sisal a la escayola sin refuerzo, lo que incrementa la tenacidad del material a medida que se aumenta la cantidad y longitud de las fibras. El compuesto más tenaz se logra con una proporción de fibra del 2% en peso y longitudes de 40 mm, representando un aumento de la tenacidad aproximadamente 60 veces mayor que la de la matriz original.

En términos de resistencia a impactos, la escayola sin refuerzo se rompe de manera frágil, pero al agregar fibras de sisal, se incrementa significativamente la resistencia del material al impacto, llegando a ser hasta 40 veces más resistente que la escayola sin refuerzo. Esto se debe a la capacidad de absorción de energía de las fibras incorporadas en la matriz.

A partir de los estudios experimentales realizados, se concluye que es tecnológicamente factible utilizar el compuesto de escayola reforzada con fibras de sisal en la fabricación de componentes constructivos para viviendas. Esto se debe al buen comportamiento del material frente a impactos, su mayor tenacidad a la flexotracción y su resistencia al fuego.

10.4 Otras investigaciones

Según el estudio titulado: *Recent advances on high performance natural (sisal) fiber cement composites* (Recientes avances en la buena actuación de fibras naturales (sisal) en compuestos cementíceos) de [62] de Flavio de A. Silva, Barzin Mobasher y Romildo D. Toledo Filho, el uso de una fibra natural de alto rendimiento (sisal) en formato de tejido para reforzar los compuestos de cemento resulta un material adecuado para aplicaciones estructurales.

Se observó un comportamiento de fisuración múltiple bajo carga de tracción. El espaciamiento de las grietas presentó una función de decaimiento exponencial con un espaciamiento de saturación de grietas de 23 milímetros.

Aunque el módulo disminuyó significativamente, el material compuesto fue capaz de alcanzar una resistencia última media de 12 MPa bajo tracción. La elevada capacidad de absorción de energía del sistema compuesto desarrollado se reflejó en unos valores de tenacidad elevados de 40,13 kJ/m²

El análisis microestructural indicó que las fibras de sisal eran capaces de puentear y detener las fibras durante la carga de tracción lo que se tradujo en un alto rendimiento mecánico y una gran capacidad de absorción de energía.

Por lo que se prevé que los materiales compuestos de matrices cementíceas reforzadas con sisal sean una opción prometedora en la construcción.

11 Impacto socioeconómico de la solución en Brasil

Incrementar el mercado una fibra producida y exportada principalmente en Brasil supondría un gran efecto en la cultura de los ciudadanos residentes y, por ende, en el mundo de la construcción y la búsqueda de estructuras sostenibles.

El refuerzo de materiales compuestos con sisal presenta unas características sostenibles y biodegradables que contribuirían en gran manera a substituir a todo tipo de materiales poliméricos los cuáles repercuten negativamente en la huella ecológica que el ser humano produce actualmente en el mundo.

Con avances en investigación, se podría hallar la forma de rebatir los problemas que pueden producirse a la hora de implementar estos compuestos en soluciones prácticas, además estos avances supondrían la creación de nuevos empleos puesto que aumentaría su producción y con ello la utilización de esta vía sostenible. Sin embargo, para que todo ello se conciba, se necesitan políticas que impulsen e incentiven a la población a crear y desarrollar este tipo de compuestos, políticas tales como la reducción de los costes de la materia prima o la mejora de la accesibilidad a las nuevas técnicas en la construcción que se vayan generando.

Además, si funcionasen de manera correcta las soluciones en la construcción, Brasil sería un país a seguir con los avances sostenibles y una guía en la lista de países motivados a emprender soluciones ecológicas.

Para finalizar, como se ha observado en la gráfica de sisal producida históricamente (véase gráfico 2), la producción de esta fibra cayó en picado cuando se empezaron a fabricar productos sintéticos y semisintéticos los cuáles hoy en día, ponen en riesgo el futuro del planeta, se debería volver a los valores producidos en su estado de auge y para ello se deben implementar cada vez más soluciones con sisal.

12 Conclusiones

A modo de conclusión se puede afirmar que reforzar una estructura de bajo coste de matriz cementícea con fibra vegetal de sisal es una solución adecuada para las estructuras de bajo coste en Brasil.

Este tipo de estructuras precisan de materiales económicos, locales, sostenibles y consistentes para realizarse y, como se ha podido observar en el proyecto, los compuestos de cemento reforzados con esta fibra presentan unas buenas propiedades mecánicas para establecerse como una gran opción dentro del mercado.

Además, se ha analizado como repercute el sisal en la economía de Brasil y su prometedor futuro en los elementos de construcción. Por tanto, con una base sólida de investigación y profundización acerca de este tipo de compuestos se podría generar un gran impacto socioeconómico en el país.

También se ha podido apreciar las propiedades de elementos como el humo de sílice o el hidróxido de calcio para aumentar la durabilidad de este tipo de compuestos, lo que generan a su vez una nueva red de investigación de cara a futuros proyectos.

Por tanto, realizar avances e implementar materiales de matriz cementícea reforzada con sisal merece formar parte de futuros análisis para un desarrollo sostenible de los elementos de construcción.

13 Presupuesto

Para realizar el presupuesto derivado de la realización del proyecto, he dividido el presupuesto en 2 partes.

Por un lado, se han calculado los costes de los materiales y licencias que han hecho falta para realizar la investigación. Por otro lado, se han analizado todos los costes que ha requerido la investigación, en lo que englobamos costes como la redacción de la memoria escrita o el coste de la obtención de datos.

13.1 Presupuesto de materiales y licencias

Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
Equipo informático (PC)	1	500	500
Microsoft Office	1	80	80
Subtotal			580 sin IVA
21% IVA			121,80
Total			701,80

Tabla 14: Presupuesto de materiales y licencias

El coste total del presupuesto material asciende a 701,80 €.

13.2 Presupuesto de investigación

Descripción	Horas	Precio por hora (€)	Importe (€)
Investigación	200	20	4000
Obtención de datos	120	20	2400
Análisis de resultados	70	20	1400

Redacción de memoria	50	12	600
Subtotal			8400 sin IVA
21% IVA			1764
Total			10164

Tabla 15: Presupuesto de investigación

El coste de la investigación asciende a 10164 €.

13.3 Presupuesto total

Descripción	Importe (€)
Total, presupuesto material	701,80
Total, presupuesto investigación	10164,00
Presupuesto total	10865,80

Tabla 16: Presupuesto total

El presupuesto total utilizado para realizar el proyecto es de 10865,80 €



14 Referencias

- [1] Bedoya, D.A. *Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas de viviendas de bajo costo estructuradas con ferrocemento*. Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2005. ISBN 9788469079157. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/93560>
- [2] Abanto, V. A. A., & De La Cruz, F. (2019). Curso de manejo y aprovechamiento de productos forestales no maderables. En *Universidad Nacional de Ucayali*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNU_6a91ab510e6728fe41ae308f3e3b5da6
- [3] Wikipedia. (2023). Universidad de São Paulo. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_de_S%C3%A3o_Paulo.
- [4] Wikipedia. (2023a). Universidad Estatal de Campinas. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_Estatal_de_Campinas.
- [5] OECD. (s.f.). Perfil de comercio internacional: Coco y otras fibras vegetales. Recuperado de <https://oec.world/es/profile/hs/coconut-and-other-vegetable-fibers>
- [6] Bianchi, P. F., Yepes, V., Vitorio, P. C., Junior, & Kripka, M. (2021). Estudio de Alternativas para el Diseño de Viviendas Sostenibles de Bajos Ingresos en Brasil. *Sostenibilidad*, 13(9), 4757. <https://doi.org/10.3390/su13094757>
- [7] B, A. C., & A, A. M. (2010). Análisis de la situación actual de la regularización urbana en América Latina: La cuestión de la tenencia segura de los asentamientos informales en tres realidades distintas: Brasil, Colombia y Perú. *Revista Invi.* <https://doi.org/10.4067/s0718-83582010000100005>
- [8] Besednjak, A. (2009). *Materiales Compuestos*. Univ. Politèc. de Catalunya.
- [9] AENOR, "UNE EN 12467:2013. Placas planas de cemento reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo.," 2013 [Online]. Disponible: <https://www.aenor.es/aenor/normas/buscadornormas/resultadobuscanormas.asp#.U7-9311sy4>.
- [10] De Santis, S., de Felice, G., & Roscini, F. (2019). Retroadaptación de bóvedas de mampostería mediante revestimientos de mortero textil reforzado con basalto. *Revista Internacional de Patrimonio Arquitectónico*, 13(7), 1061-1077.
- [11] Mercedes, L., Gil, L., & Gil, L. (2018). Comportamiento mecánico del material compuesto de matriz cementosa reforzada con tejido vegetal (FRCM). *Materiales de construcción*, 175, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>
- [12] Cedeño, M., & Enrique, L. E. P. (2019). *Análisis del comportamiento frente acciones cíclicas de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de matriz inorgánica y tejidos de fibras vegetales*. En TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). <https://upcommons.upc.edu/bitstream/2117/170439/1/TLEMC1de1.pdf>
- [13] Cevallos, O. (2022, 13 mayo). *Materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibra natural aplicados en estructuras de hormigón armado, estudio de revisión*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9055>.
- [14] Bhattacharyya, D., & Debnath, S. (2015). Fibras vegetales. Springer. doi: 10.1007/978-81-322-2164-8.
- [15] Velásquez, Sandra & Peláez Arroyave, Gabriel & Giraldo, Diego. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *Informador Técnico*. Doi: 10.23850/22565035.324.

- [16] Alfredo, G. G. J. (s. f.). *Materiales Compuestos de Fibras Naturales - Archivo Digital UPM*. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.55053>.
- [17] Exchange, T. (2020). Informe sobre el mercado de fibras y materiales preferidos para 2020. *Bolsa Textil*.
- [18] Syduzzaman, Faruque, A. A., Bilisik, K., & Naebe, M. (2020). Compuestos reforzados con fibras naturales de origen vegetal: Una revisión en la fabricación, propiedades y tratamientos aplicados. *10(10)*, 973. <https://doi.org/10.3390/coatings10100973>
- [19] Jawaid, M., Khalil, H. A., & Abu Bakar, A. (2011). Propiedades físicas y mecánicas de las fibras de coco. *Revista internacional de ingeniería mecánica y de materiales*, 6(1), 104-109. <https://doi.org/10.3390/polym13081323>
- [20] Monteiro, S. N., Terrones, L., & d'Almeida, J. R. M. (2008). Comportamiento mecánico de los compuestos de fibra de coco y poliéster. *Pruebas de polímeros*. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.03.003>.
- [21] Khalil, H. A., Jawaid, M., & Bakar, A. A. (2015). Efecto del tratamiento con álcali en las propiedades mecánicas y térmicas del compuesto polimérico reforzado con fibra de coco. *Revista Internacional de Ciencias de los Polímeros*, 2015, 1-7. doi: 10.1155/2015/484834.
- [22] A.L.F.S. D'Almeida, J.M. Filho, R.D.T. Filho. Uso de fibras de curaua como refuerzo en compuestos de cemento. *Chem. Eng. Trans.*, 17 (2009), pp. 1717-1722, [10.3303/CET0917287](https://doi.org/10.3303/CET0917287)
- [23] P.H.M. Cardoso, F.L. Bastian, R.M.S.M. Thiré. Fibras de Curaua / Laminados epoxi con propiedades mecánicas mejoradas: Efectos de las condiciones de tratamiento de las fibras. *Macromol. Symp.*, 344 (2014), [10.1002/masy.201300225](https://doi.org/10.1002/masy.201300225).
- [24] Sanadi, M. R., Caulfield, J. R., & Jacobson, R. E. (1993). Propiedades mecánicas de las fibras de lino. *Revista de Ciencia de Polímeros Aplicada*, 47(10), 1735-1745.
- [25] Salvador, M., Amigó, V., Nuez, A., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Martí, F. (2008, June). Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas. In *X Congreso Nacional de Materiales* (Vol. 4, pp. 1-4).
- [26] Amigó, V., Salvador, M. D., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Martí, F. (2009). Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos. *Instituto de Tecnología de Materiales Universidad Politécnica de Valencia, España*.
- [27] Goh, K. L., Pickering, K. L., & Foreman, N. J. (2009) Propiedades mecánicas de los compuestos de poliéster reforzados con fibras naturales: Fibras de yute, coco y sisal. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Doi: 10.1016/j.msea.2008.10.054.
- [28] Shahriari Khalaji, M., & Lugolobi, I. (2020). Aplicación biomédica del algodón y sus derivados. *Ciencia y tecnología de transformación del algodón: gen, desmotado, confección y reciclado ecológico*, 393-416. DOI: [10.1007/978-981-15-9169-3_17](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9169-3_17)
- [29] GUADUA 6 METROS – GUADUA BAMBU COLOMBIA.” [Online] Disponible: <https://guadwabambucolombia.com/guadua-inmunizada/>. [Accessed: 15-Mar-2023].
- [30] Aplicación en fibras naturales” (p.17), por Shireesha, Y.Nandipati, 2019, Materiales de hoy: Procedimientos. Doi: [10.3390/fib9010006](https://doi.org/10.3390/fib9010006).
- [31] Tang, Z., Ali, M., & Chouw, N. (2014). Resistencia residual a la compresión y al cizallamiento de nuevos bloques entrelazados de hormigón reforzado con fibra de coco. *Materiales de construcción*, 66, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.094>

- [32] Tan, H., Yan, L., Huang, L., Wang, Y., Li, H., & Chen, J. (2017). *Comportamiento de cilindros de hormigón con fibra de sisal envueltos externamente con FRP de yute*. <https://doi.org/10.1002/pc>
- [33] BRAGANÇA, M., Bonato, M. M., Portella, K. F., Bronholo, J. L., Vieira, M. E., & dos Santos, J. C. M. (2014). Rendimiento de postes de hormigón con adiciones orgánicas y fotocatalíticas. *Artigo: Espaço Energia*.
- [34] Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005b). Estudios sobre la durabilidad de las fibras naturales y el efecto de las fibras corroídas en la resistencia del mortero. *Compuestos de cemento y hormigón*, 27(5), 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008>
- [35] Lima, P. G., Filho, R. D. T., & Filho, J. G. M. (2013). Comportamiento tensión-deformación en compresión de compuestos de mortero de cemento reforzados con fibra corta de sisal. *Investigación de Materiales-Revista Iberoamericana de Materiales*. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392013005000181>.
- [36] De Gutiérrez, R. M., Díaz, L. N., & Delvasto, S. (2005). Efecto de las puzolanas en el comportamiento de los morteros reforzados con fibras. *Compuestos de cemento y hormigón*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.010>.
- [37] Hakamy, A., Shaikh, F., & Low, I. M. (2013). Microestructuras y propiedades mecánicas de nanocompuestos de organoarcilla y cemento reforzados con tejido de cáñamo. *Materiales de construcción*, 49, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.028>
- [38] Ardanuy, M., Aguado, A., & Gettu, R. (2015). Durabilidad de los materiales compuestos de cemento reforzados con fibras. *Materials*, 8(9), 5915-5943. doi:10.3390/ma8095267.
- [39] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocompuestos reforzados con fibras naturales: 2000-2010. *Avances en la ciencia de los polímeros*, 37(11), 1552-1596.
- [40] Pacheco, J. G., & Jalali, S. (2011). Caracterización de fibras de sisal para el refuerzo de materiales compuestos a base de cemento. *Journal of Materials in Civil Revista de Materiales de Ingeniería Civil*, 23(6), 891-898. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000209
- [41] Velásquez, J. A., Castro, C., & Gañán, P. (2016). Métodos químicos para la modificación de fibras y su influencia en las propiedades de los materiales compuestos. *DYNA*, 83(196), 204-211
- [42] Rodríguez, O. (2020). *Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/18539>.
- [43] Colaboradores de Wikipedia. (2022, 31 de diciembre). Richard Hindorf. En Wikipedia, La enciclopedia libre. Recuperado el 6 de junio de 2023, de https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Richard_Hindorf&oldid=1130738398
- [44] De Girona Departament d'Enginyeria Química Agrària I Tecnologia Agroalimentària, U. (2013, 18 octubre). *Valoración de materiales compuestos de HDPE reforzados con fibras de Agave sisalana. Aproximación a un paradigma de geometría fractal para las fibras*. <http://hdl.handle.net/10803/125714>
- [45] SILVA, FILIPE P.M. (2015), Desarrollo territorial: la experiencia del sisal en Bahía, 1ª ed. Lauro de Freitas, Bahía, Editorial FPMS
- [46] Filipe Prado Macedo Da Silva (2016). *El mercado de fibras naturales en una economía globalizada*. Fundación de Estudios Rurales ANUARIO 2016.
- [47] Lima, P. G., Santos, R. M. F., Ferreira, S. R., & Filho, R. D. T. (2014). Caracterización y tratamiento de residuos de fibra de sisal para su aplicación en composites a base de

cemento. *Ingeniería Agrícola*, 34(5), 812-825. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162014000500002>.

[48] De Andrade Silva, F., Filho, R. D. T., De Almeida Melo Filho, J., & De Moraes Rego Fairbairn, E. (2010). Propiedades físicas y mecánicas de compuestos duraderos de fibra de sisal y cemento. *Materiales de construcción*, 24(5), 777-785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>

[49] Cevallos, O. A., & Olivito, R. S. (2015). Efectos de los parámetros del tejido en el comportamiento a tracción de los compuestos cementosos sostenibles. *Composites Parte B-ingeniería*, 69, 256-266. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.004>

[50] Melo Filho JA. *Desarrollo y caracterización experimental de laminados a base de cemento reforzados con fibras largas de sisal*, Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Federal de Río de Janeiro; 2005.

[51] Bisanda ETN. Fabricación de paneles de cubierta a partir de compuestos reforzados con fibra de sisal. *Revista de Procesamiento de Materiales Technology* 1993;38:369–80

[52] Mercedes, L., Gil, L., & Gil, L. (2018). Comportamiento mecánico de materiales compuestos de matriz cementosa reforzada con tejido vegetal (FRCM). *Materiales de construcción*, 175, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>

[53] UNE-EN 1504-3:2006 *Productos y sistemas para la protección y r.(s. f.)*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0037931>

[54] Norma EN 1015-11:2000, Métodos de ensayo de productos para la fijación de morteros para albañilería.

[55] De Andrade Silva, F., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2010). Comportamiento a fatiga de los compuestos de cemento reforzados con fibra de sisal. *Ciencia e ingeniería de materiales A- Propiedades estructurales de los materiales Microestructura y procesamiento*, 527(21-22), 5507-5513. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.007>

[56] Filho, R. D. T., Ghavami, K., England, G. L., & Scrivener, K. (2003). Desarrollo de materiales compuestos de fibra vegetal y mortero de mayor durabilidad. *Compuestos de cemento y hormigón*, 25(2), 185-196. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00018-5)

[57] Gram, H. (1984). Durabilidad de las fibras naturales en el hormigón. *Cemento y hormigón reforzados con fibras naturales*. <http://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:960479>.

[58] Filho, R. D. T., De Andrade Silva, F., De Moraes Rego Fairbairn, E., & De Almeida Melo Filho, J. (2009). Durabilidad de laminados de mortero reforzados con fibra de sisal moldeados por compresión. *Materiales de construcción*, 23(6), 2409-2420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>

[59] Olivito, R. S., Cevallos, O. A., & Carrozzini, A. (2014). Desarrollo de compuestos cementosos duraderos utilizando tejidos de sisal y lino para el refuerzo de estructuras de mampostería. *Materiales en ingeniería*, 57, 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.023>

[60] Frazão, C. M. V., Barros, J. A. O., Filho, R. D. T., Ferreira, S. R., & Gonçalves, D. (2018). Desarrollo de paneles sándwich que combinan compuestos de fibra de sisal y cemento y hormigón ligero reforzado con fibras. *Compuestos de cemento y hormigón*, 86, 206-223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.008>

[61] José, I. S. (1993). Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste. *Informes De La Construcción*. <https://doi.org/10.3989/ic.1993.v45.i425-426.1190>

[62] Silva, F., Mobasher, B., & Toledo Filho, R. (2008). Avances recientes en los compuestos de fibrocemento natural (sisal) de alto rendimiento. En BEFIB 2008 Procedimientos de conferencia, 17-19 de septiembre de 2008, Chennai. <https://doi.org/10.3390/ma12203297>

Figuras

[63] Sudré, C. O. E. M. Y. L. (2020b, March 26). Brasil. Escasez de agua y solidaridad: cómo las favelas se enfrentan a la pandemia. *Kaos En La Red*. <https://archivo.kaosenlared.net/brasil-escasez-de-agua-y-solidaridad-como-las-favelas-se-enfrentan-a-la-pandemia/>

[64] *Refuerzo estructural, modernización y adaptación sísmica – SHRADHA SABURI ENGINEERS PVT LTD.* (n.d.). <http://shradhasaburiengineers.in/service/structural-strengthening-upgrades-seismic-retrofits>

[65] De Sino Reto, M. A., & De Sino Reto, M. A. (2021) La Fibra de Curauá sustituye a la Fibra de Vidrio: Compuesto termoplástico de Poliamida 6 con Fibra Natural de Curauá. *PLÁSTICO.com.br - O Portal Da Revista Plástico Moderno*. <https://www.plastico.com.br/noticias-fibra-de-curaua-substitui-a-de-vidro/>

[66] *Lino crudo*. (n.d.). Tejo Lo Que Hilo. <https://tejoloquehilo.es/es/fibra-vegetal/184-1742-comprar-lino-crudo.html>

[67] Sostenibilidadmasvida. (2023). Tipos de Fibras Textiles | Cuáles son más saludables y sostenibles. *Sostenibilidadmasvida*. <https://sostenibilidadmasvida.com/textil/fibras-textiles/>

[68] Iribarren, G. F., & Iribarren, G. F. (2020). Fibras textiles naturales | Producción Textil responsable. *Gabriel Farias Iribarren | Industria Textil, Moda Y Retail | Blog #1 Aprovechamiento De Moda. Industria Textil Y Retail. Artículos Y Noticias Del Sector, Sourcing Sustentable Y Moda Sostenible. Profesionales Del Sector*. <https://gabriefariasiribarren.com/fibras-textiles-naturales/>

[69] colaboradores de Wikipedia. (2023). Agave sisalana. *Wikipedia, La Enciclopedia Libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Agave_sisalana

[70] Limited, A. (n.d.). *Fibras de sisal secando fotografías e imágenes de alta resolución - Alamy*. Alamy. <https://www.alamy.es/imagenes/sisal-fibers-drying.html?sortBy=relevant>

[71] *94 Humo de sílice para hormigón - Humo de sílice para la venta, microsílíce proveedor en China*. (2018, January 11). Humo De Sílice Para La Venta, Microsílíce Proveedor En China. <http://es.silicafumesupplier.com/94-humo-silice-hormigon.html>

[72] Morao, D. (2021). Descubriendo el hidróxido cálcico y sus múltiples aplicaciones. *CALCINOR. Minerales Industriales*. <https://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/hidroxido-calcico-aplicaciones>