



ESTUDIO COMPARATIVO DE FIBRAS NATURALES PARA REFORZAR HORMIGÓN

Trabajo final de grado
Universitat Politècnica de València
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura

Autora | Aida Martín Sendra
Tutor | José María Vercher Sanchis
Curso | 2019 - 2020
Titulación | Grado en Fundamentos de la Arquitectura

ESTUDIO COMPARATIVO DE FIBRAS NATURALES PARA REFORZAR HORMIGÓN

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ARQUITECTURA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

TRABAJO FINAL DE GRADO

AUTOR | AIDA MARTÍN SENDRA

TUTOR | JOSÉ MARÍA VERCHER SANCHIS

TITULACIÓN | GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

CURSO | 2019 - 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

ESTUDIO COMPARATIVO DE FIBRAS NATURALES PARA REFORZAR HORMIGÓN

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es exponer mediante un estudio comparativo las propiedades, procesos de obtención, sostenibilidad y prestaciones de diversos tipos de fibras naturales vegetales obtenidas a partir de: coco, yute, algodón, caña de azúcar, cáñamo, lino y sisal, empleadas en el refuerzo del hormigón. Además, también se estudian otras dos fibras naturales minerales, empleadas en la actualidad, la fibra de vidrio y la fibra de acero. Primero se realiza un análisis individualizado de cada tipo de fibra natural elegido y más tarde se exponen las conclusiones obtenidas de una forma gráfica y comparativa.

El estudio también analiza si existe la posibilidad de reducir la cantidad de cemento que se emplea en la elaboración del hormigón a través de la sustitución parcial de éste por alguna de las fibras naturales estudiadas, sin disminuir sus propiedades o incluso mejorándolas. También se analizan los materiales más empleados actualmente para la sustitución parcial del cemento. La finalidad es poner en valor y dar a conocer las mejores opciones en cuanto al uso de fibras naturales.

PALABRAS CLAVE

Fibras naturales, Fibras, Hormigón reforzado, Cemento, Materiales de construcción, Sostenibilidad.

COMPARATIVE STUDY OF NATURAL FIBRES FOR REINFORCING CONCRETE

ABSTRACT

The purpose of this paper is to set out, through a comparative study, the properties, obtaining processes, sustainability and benefits of various natural vegetal fibres for their application in reinforced concrete. The fibres studied are obtained from: coconut, jute, cotton, sugarcane, hemp, linen and sisal. Furthermore, also glass and steel fibres are studied, two natural mineral fibres that are the most used nowadays. To do so, an individual analysis of each natural fibre is developed, and then, conclusions and comparisons are exposed in a graphic and comparative way.

It is also analysed the possibility of a partial reduction of the cement, that is currently used in the process of obtaining concrete, by replacing it with some of the natural fibres studied, without reducing its qualities or even improving them. In addition, the most commonly used materials for the partial replacement of cement are also analysed. It is carried out in order to highlight the best options in terms of the use of natural fibres.

KEY WORDS

Natural fibres, Fibras, Reinforced concrete, Cement, Construction materials, Sustainability.

ESTUDI COMPARATIU DE FIBRES NATURALS PER A REFORÇAR FORMIGÓ

RESUM

L'objectiu d'aquest treball és exposar mitjançant un estudi comparatiu les propietats, processos d'obtenció, sostenibilitat i prestacions de diversos tipus de fibres naturals obtingudes a partir de: coco, jute, cotó, canya de sucre, cànem, lli i sisal, i que son emprades en el reforç del formigó. A més, també s'estudien dos fibres naturals minerals, emprades en l'actualitat, la fibra de vidre i la fibra d'acer. Primerament es realitza una anàlisi individualitzada de cada tipus de fibra natural triat, posteriorment s'exposen les conclusions obtingudes d'una manera gràfica i comparativa.

L'estudi també analitza si existeix la possibilitat de reduir la quantitat de ciment que s'utilitza en l'elaboració del formigó a través de la substitució parcial d'aquest per alguna de les fibres naturals estudiades, sense disminuir les seues propietats o fins i tot millorant-les. També s'analitzen els materials més emprats actualment per a la substitució parcial del cement. Es realitza amb la finalitat de posar en valor i donar a conèixer les millors opcions quant a l'ús de fibres naturals.

PARAULES CLAU

Fibres naturals, Fibres, Formigó reforçat, Ciment, Materials de construcció, Sostenibilitat.

ÍNDICE

1 METODOLOGÍA	1
2 OBJETIVOS	1
2.1 OBJETIVOS	1
2.2 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	2
3 INTRODUCCIÓN	4
3.1 CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES SOSTENIBLES	4
4 MATERIALES COMPUESTOS	7
4.1 COMPONENTES	7
5 EL HORMIGÓN	9
5.1 INTRODUCCIÓN	9
5.2 ANTECEDENTES	9
5.3 HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS (HRF).....	9
6 LAS FIBRAS	11
6.1 INTRODUCCIÓN	11
6.2 ANTECEDENTES	11
6.3 CLASIFICACIÓN TIPOS DE FIBRAS	12
6.4 COMPOSICIÓN.....	16
7 FIBRAS NATURALES VEGETALES	17
7.1 FIBRA DE COCO.....	17
7.2 FIBRA DE YUTE.....	21
7.3 FIBRA DE ALGODÓN	25
7.4 FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR	28
7.5 FIBRA DE CÁÑAMO	32
7.6 FIBRA DE LINO	35
7.7 FIBRA DE SISAL.....	38

8 FIBRAS NATURALES MINERALES	41
8.1 FIBRA DE VIDRIO.....	41
8.2 FIBRA DE ACERO.....	43
9 ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS FIBRAS NATURALES	45
9.1 COMPOSICION QUIMICA DE LAS FIBRAS VEGETALES	45
9.2 PROPIEDADES FÍSICAS.....	47
9.3 RELACIÓN ENTRE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS VEGETALES.....	48
9.4 RESISTENCIAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS NATURALES.	50
9.5 SOSTENIBILIDAD	54
9.6 PRECIO.....	55
10 SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO.....	56
10.1 HUMO DE SÍLICE	57
10.2 CENIZAS VOLANTES.....	58
10.3 CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR	59
11 CONCLUSIONES.....	60
12 REFERENCIAS	61
13 ÍNDICE DE IMÁGENES	68
14 ÍNDICE DE TABLAS.....	70
15 ÍNDICE DE GRÁFICAS	72

“Los materiales concuerdan armoniosamente entre sí y producen un brillo, y en esa composición de materiales surge algo único. Los materiales no tienen límites [...]. Un mismo material tiene miles de posibilidades.”

Peter Zumthor, 2003

1 | METODOLOGÍA

El proceso seguido para la elaboración de este trabajo ha consistido en seguir las siguientes directrices:

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Búsqueda y recopilación de la máxima información posible acerca del hormigón y los tipos de fibras naturales estudiados. Antecedentes e información necesaria para conocer la situación actual de estos materiales y para la realización del estudio. Obtenidos principalmente en bases de datos de artículos científicos (Scopus, Elsevier) y otros soportes digitales como el de la Biblioteca de la Universidad Politécnica de Valencia (Riunet).

SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN

Seleccionar y clasificar la información recopilada con criterio, determinando cuál es la documentación más relevante e interesante que puede ser objeto de estudio.

ANÁLISIS Y ESTUDIO COMPARATIVO

Realizar un análisis completo de cada uno de los tipos de fibras naturales objeto del estudio sus prestaciones y su sostenibilidad primero de forma individual con la información recopilada en los puntos anteriores. Finalmente realizar el estudio comparativo de las fibras naturales según los resultados obtenidos en el análisis y gracias a la información previamente citada, así como toda la información consultada que aparece en la bibliografía.

2 | OBJETIVOS

2.1 | OBJETIVOS

Uno de los objetivos principales del siguiente estudio es el de analizar y **comparar las propiedades** y características de las distintas fibras naturales que se pueden utilizar para reforzar el hormigón.

Actualmente el uso de hormigón reforzado con fibras está muy extendido, no tanto cuando se trata de fibras naturales vegetales, por lo tanto, otro objetivo es **estudiar el carácter sostenible** de las fibras procedentes del coco, yute, caña de azúcar, cáñamo, lino, algodón y sisal frente a otras fibras naturales minerales utilizadas actualmente como la de vidrio y acero para comprobar si es posible su sustitución.

Conocer las propiedades de este tipo de fibras es necesario para comprender en qué aspectos pueden mejorar o empeorar las propiedades mecánicas y físicas del hormigón para saber si pueden sustituir a otras fibras utilizadas actualmente. El objetivo final es determinar cuál es la mejor opción para su aplicación en la construcción y comprobar si es posible la **reducción del uso de cemento**, para la creación de hormigón, sustituyéndolo parcialmente por las fibras naturales para obtener un hormigón más sostenible.

2.2 | OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de desarrollo sostenible son una serie de objetivos globales aprobados por la ONU para conseguir un mundo más sostenible e igualitario antes de 2030 y que cuenta con la participación de gobiernos, sector privado y toda la sociedad en general.

Son 17 metas que abarcan diferentes aspectos sociales, económicos y sostenibles (Imagen 1). Otro de los objetivos de este estudio es tratar de aportar alguna solución para la contribución de cara a conseguir un mundo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.[1]

Los objetivos de desarrollo sostenible en los que encaja el tema del trabajo son el 11 y el 12, que corresponden respectivamente a: ciudades y comunidades sostenibles; y producción y consumo responsables.



Imagen 1 // Objetivos de desarrollo sostenible. Imagen de Naciones Unidas.

2.2.1 | CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

El crecimiento urbano de los últimos decenios ha sido extremadamente elevado y la previsión para los próximos años es un aumento progresivo, por lo que es fundamental planificar y gestionar el crecimiento urbanístico para lograr unas ciudades más sostenibles. Para conseguir un crecimiento sostenible es necesario aprovechar los recursos, reducir la contaminación y prosperar sin sabotear la tierra.

“A pesar de que las ciudades solo ocupan el 3% de la superficie terrestre, son las que causan más del 70% del consumo de energía y las responsables de liberar a la atmósfera el 75% de las emisiones de carbono.” [2]

Además de un crecimiento regulado es necesario que los edificios proyectados sean más sostenibles para no producir un consumo excesivo de energía tanto en su creación como en su uso diario, consiguiendo una urbanización inclusiva y sostenible.

La relación de este objetivo con el trabajo planteado sería que si se consigue fomentar el uso de un hormigón reforzado que consuma menos recursos, emita menos emisiones durante su obtención y sea menos costoso energéticamente se pueda ayudar al desarrollo de una ciudad más sostenible.

2.2.2 | PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

“El consumo y la producción sostenibles consisten en hacer más y mejor con menos.” [3]

La producción y el consumo responsables son dos factores importantes ya que se prevé un aumento de la demanda de recursos naturales, siendo algunos limitados, por lo que se ha de buscar alternativas más sostenibles u otras fuentes de obtención de materia prima para los materiales de construcción.

Para conseguir tanto una producción como un consumo responsable se debe empezar por la reducción de los desechos en todos los pasos del proceso constructivo, desde la obtención de la materia prima hasta la puesta en obra. En el trabajo se analiza la posibilidad de una sustitución parcial del cemento en el hormigón por algunas fibras naturales, que pueden ser obtenidas del reciclaje o de los desechos.

También es importante pensar en un consumo más consciente, desde reducir la cantidad de material empleado hasta dar una segunda vida a algunos materiales de construcción. Es importante que a la vez estos nuevos materiales sean duraderos y sostenibles para evitar un mayor consumo a largo plazo.

3 | INTRODUCCIÓN

3.1 | CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES SOSTENIBLES

La construcción es una de las mayores consumidoras de materia prima, aproximadamente un 40% de los materiales extraídos en España van dirigidos a su uso en el sector de la construcción. El consumo de energía del sector representa entre el 30% y el 40% siendo uno de los mayores emisores de dióxido de carbono. El sector también genera el 30% de residuos sólidos, que es el equivalente a una tonelada por habitante y año en España. Además, se produce un 20% de la contaminación de las aguas a lo largo de toda la producción de la construcción. [4][5]

Para conseguir una construcción sostenible se tiene que considerar el impacto medioambiental que se produce en todos los pasos de la construcción, desde la obtención de los materiales hasta los métodos de construcción utilizados. Las construcciones, por pequeñas que sean, tienen una huella medioambiental. Debido al incremento de la población en las últimas décadas el impacto que ha producido el sector de la construcción se ha incrementado también en gran medida. [5]



Imagen 2 // Ciclo de vida de los materiales. Imagen de Klarea.

Un desarrollo sostenible se puede conseguir utilizando materias primas y energías renovables, reduciendo la cantidad de materia y energía utilizada para la extracción de recursos naturales y en la gestión, destrucción o reciclaje adecuado de los residuos.

El ciclo de vida de los materiales de construcción (Imagen 2) es básico para obtener una mayor sostenibilidad en las construcciones. Conocer las emisiones generadas en cada uno de los pasos de la producción y utilización de los materiales permite conocer su sostenibilidad global. Un material que puede resultar aparentemente sostenible puede que no lo sea por el proceso de obtención en el que se ve envuelto o la poca durabilidad que tenga a largo plazo, necesitando ser sustituido cada cierto tiempo convirtiéndose así en un material menos sostenible.

“La importancia en la elección de los elementos y materiales es fundamental, y tiene una incidencia mucho mayor de lo que se supone generalmente en el comportamiento de adecuación de los edificios y el gasto energético.”[6]

Para determinar si un material de construcción es sostenible o no, se debe analizar todo el proceso que abarca la construcción. Las etapas a considerar son:

El origen, los recursos naturales son limitados, por lo que se debe estudiar si esa materia prima que procede de ellos puede volver a generarse con facilidad, o si, por el contrario, son materiales no renovables y su utilización lleva a su agotamiento. También hay que tener en cuenta otros recursos naturales utilizados en su obtención.

El proceso de extracción de las materias primas, puede que sea muy costoso o poco sostenible, por ejemplo, la tala descontrolada de miles de hectáreas forestales para conseguir madera.

La manufacturación o el proceso de fabricación, transformar las materias primas obtenidas mediante procesos industriales puede ser poco sostenible por la gran cantidad de energía utilizada en la transformación de los materiales o por los gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera. Junto a la fase de extracción esta es la etapa con mayor impacto ambiental. [7]

El transporte y la distribución, los materiales kilómetro cero, que son aquellos obtenidos en la misma ciudad o país donde se realiza la construcción no tienen la misma huella ecológica que aquellos que tienen que ser transportados durante largos trayectos, ya sea por medio terrestre, aéreo o acuático con la contaminación que eso supone.

La puesta en obra de los materiales, provoca una ocupación del suelo, además de la contaminación acústica producida por las máquinas que ayudan a los operarios a la colocación de los elementos que conforman la edificación. También es importante saber si los métodos de construcción y los materiales empleados ayudaran al confort térmico y acústico del edificio para evitar pérdidas de calor.

El uso y mantenimiento de los materiales de construcción es determinante, ya que si se utilizan materiales que con un mantenimiento menor tengan una mayor duración será más sostenible que si se utilizan otros con una esperanza de vida menor que deberán ser sustituidos a corto plazo o que requieran de procesos de mantenimiento muy costosos o contaminantes. [8]

La gestión de los desechos es el último paso en el estudio del ciclo de vida de un material para determinar su sostenibilidad. Conocer si cuando el edificio vaya ser demolido o transformado, se podrían reutilizar o reciclar los elementos que lo componen, o si se convierten directamente en residuos con los que no se puede hacer nada.

“Todo fluye, todo cambia y nada permanece.” [9] Esto ocurre en todos los ámbitos, la arquitectura y los materiales de construcción no son campos que se libren de ello, tienen que evolucionar y adaptarse a los cambios, por eso, en un mundo cada vez más desarrollado y tecnológico no se puede dejar de lado la sostenibilidad y el desarrollo sostenible. Una arquitectura más sostenible es cada vez más necesaria en todas las fases del proceso constructivo, la búsqueda de nuevos materiales de construcción que sean más sostenibles, que se puedan reutilizar, que reutilicen los residuos de otras construcciones o incluso de otros sectores, es continua. La aparición de nuevos materiales y sistemas constructivos es necesaria.

Es una tendencia que se encuentra al alza gracias a la investigación que permite diseñar y fabricar materiales nuevos con propiedades que eran inimaginables hasta hace unos cuantos años.

El propósito de conseguir una arquitectura más sostenible, a través de nuevos materiales, justifica el objetivo del estudio comparativo de las fibras naturales más comunes, para determinar si su sostenibilidad es real. Determinar si es posible la incorporación de estas en un material mundialmente utilizado como es el hormigón, para obtener un material con mejores prestaciones, y que, además, respete el medioambiente.

4 | MATERIALES COMPUESTOS

“Material compuesto. *m. Combinación de dos o más materiales a partir de una unión química o no química. El compuesto formado posee propiedades mejores que las que presentan los materiales componentes por sí solos.*” [10]

Una de las características principales de los materiales compuestos es que son heterogéneos, es decir, sus componentes no llegan a disolverse o fusionarse completamente, lo que se traduce en un comportamiento anisotrópico. Los componentes de los materiales compuestos son la matriz y un material de refuerzo (Imagen 3). [10]

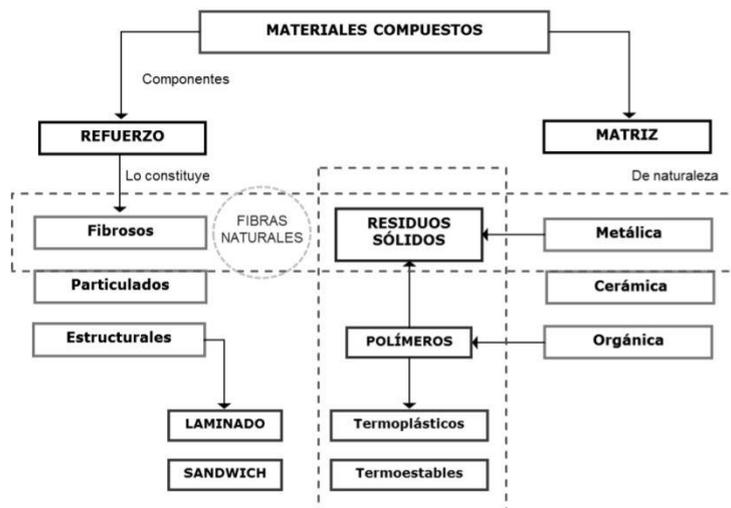


Imagen 3 // Diagrama de clasificación de los materiales compuestos. Imagen de la clasificación realizada por Mott, 2009.

4.1 | COMPONENTES

4.1.1 | MATRIZ

La matriz es el componente que aparece en fase continua y actúa como ligante. Suele ser un material menos resistente que el material de refuerzo. Su función es la de proporcionar estabilidad al conjunto transmitiendo las cargas producidas al refuerzo, evitar problemas, proteger, mantener alineadas las fibras y brindar cohesión. La matriz se comporta de diferente manera dependiendo de cómo sea la carga que actúa sobre ella. En el caso del hormigón reforzado con fibras, cuando el esfuerzo realizado es a compresión, la matriz es la encargada de soportar el esfuerzo. Sin embargo, cuando el esfuerzo es a tracción la matriz transfiere la carga a las fibras para que sean ellas las encargadas de soportarlo. [11]

4.1.2 | REFUERZO

El refuerzo es el componente que aparece en fase discontinua, se agrega a la matriz y aporta las propiedades resistentes o aquellas que la matriz no tiene. Se puede incorporar en forma de partículas, fibras o barras, cuando se trata de refuerzo para elementos estructurales. Generalmente, cuanto menor sea el tamaño de las partículas y más homogéneamente estén distribuidas más efectivas serán. [12]

Para conseguir un material compuesto sostenible se debe buscar que los materiales de refuerzo sean ecológicos como por ejemplo las fibras naturales vegetales. Cuando una de las partes del material compuesto es ecológica se obtiene un *Green composite*. [11]

La clasificación de los materiales compuestos se rige según el material predominante de la matriz. Hay tres grandes grupos: los de matriz metálica, los de matriz cerámica y los de matriz orgánica. [12]

La capacidad que una fibra tiene para reforzar está relacionada con el grado en que los esfuerzos son transferidos a la matriz, que, a la vez, dependen de las propiedades intrínsecas de las fibras, como la resistencia a tensiones y la resistencia frente a deformaciones, que debe ser superior a la de la matriz para evitar grietas. El alargamiento de rotura, la adherencia, la capacidad de absorción, la densidad y el diámetro son otras propiedades relevantes para el estudio de las fibras, ya que son las que determinan si una fibra es adecuada o no. [13]

5 | EL HORMIGÓN

“Hormigón. m. Material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava y cemento o cal, y que, al fraguar, adquiere más resistencia.” [14]

5.1 | INTRODUCCIÓN

El hormigón es un pétreo artificial que se encuentra dentro del grupo de materiales compuestos, es decir, es la combinación de diversos componentes entre los que se provoca un efecto sinérgico consiguiendo un nuevo material con unas propiedades mejoradas respecto a las de los materiales previos por separado. Está formado por un conglomerante, que suele ser cemento, y los agregados, que son áridos finos, áridos gruesos y agua. [15]

5.2 | ANTECEDENTES

El hormigón es y ha sido uno de los materiales de construcción más utilizado a lo largo de la historia. Durante el Paleolítico y Neolítico se utilizaba como material de construcción para muros la mampostería en seco y a pesar de que se intentaba conseguir uniones lo más homogéneas posibles este tipo de construcciones multiplicaban la aparición de tensiones lo que conllevaba a la rotura de piedras e incluso al colapso de las construcciones. Más tarde se empezó a rellenar las capas utilizando un mortero que ayudaba a repartir las cargas equitativamente previniendo la rotura. A lo largo de la Edad Antigua fueron surgiendo nuevos materiales conglomerantes, por ejemplo, en Mesopotamia se utilizaban breas de petróleo y en Egipto la cal. [15]

Con la llegada del Imperio Romano, surgió el mejor hormigón creado hasta la fecha, tanto por la calidad constructiva que tenían los romanos como por los materiales utilizados, ya que como conglomerante se empleaba cal y como agregado se utilizaba ceniza de arenas volcánicas o puzolánicas de alta calidad consiguiendo propiedades físicas y mecánicas prácticamente iguales a las actuales.

Después de esa etapa, hay un gran parón hasta la Revolución industrial cuando aparece el hormigón armado con acero y cuando surgen figuras ilustres de la ingeniería que empiezan a observar las cualidades de los morteros para determinar cuáles son mejores. Es a mediados de la última década del siglo XIX cuando se empiezan a realizar trabajos experimentales para determinar algunos valores fundamentales para el cálculo de las estructuras de hormigón, como los coeficientes de elasticidad o la cantidad de refuerzo necesaria. Finalmente, no sería hasta principios del siglo XX cuando se crea una normativa específica para España, siendo uno de los últimos países europeos en tenerla. [15][16]

5.3 | HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS (HRF)

Los hormigones reforzados con fibras nacen de la necesidad de obtener un material mejorado, al incorporar las fibras cortas y desordenadas en su masa se produce una mejora de las propiedades del hormigón. Dependiendo del tipo de fibra utilizado se puede obtener un mejor comportamiento frente a distintas sollicitaciones, como el fuego, el agua, la resistencia mecánica, fisuras u otros daños.

Algunas de las ventajas que presentan los hormigones reforzados con fibras frente a los no reforzados son:

- Control de la fisuración.
- Mejoras en la durabilidad.
- Aumento de la resistencia a impacto.
- Aumento de la resistencia a la abrasión.
- Reducción de los espesores en las construcciones.
- Aplicación más simple y rápida.
- Disminución de los costes de mano de obra.
- Eliminación del mallado.

A la hora de añadir fibras al hormigón, se debe tener en cuenta algunos factores como puede ser el porcentaje de adición, una incorporación demasiado elevada puede llegar a influir de manera negativa en el resultado final. La relación agua – cemento – fibras, influye en la porosidad final de la mezcla y por lo tanto en su comportamiento. La forma y disposición de las fibras incorporadas también influye en la trabajabilidad y efectividad del hormigón. [17]

Sin embargo, al aparecer el ladrillo cocido, las fibras vegetales se ven relegadas a un segundo plano y, aunque no quedan en un desuso total, cambia la forma en la que eran utilizadas siendo más empleadas como elementos decorativos o de protección frente a las inclemencias meteorológicas.

Actualmente las fibras y los recursos naturales vegetales todavía son muy utilizados en algunas regiones o culturas, como la oriental. En Asia, el uso de algunas fibras vegetales, especialmente la materia prima de la que se extraen algunas, como el bambú, es muy importante tanto como elemento constructivo como en el uso de algunas estructuras auxiliares utilizadas durante el desarrollo de la edificación por su alta resistencia, flexibilidad y fácil manejo (Imagen 6).



Imagen 5 // Mezquita Djinguereber Mali. Imagen de Arkiplus.



Imagen 6 // Andamios de bambú. Imagen de Macfromlondon.

Coincidiendo con el auge de nuevas tendencias más ecológicas en la arquitectura, como las viviendas pasivas, residencias con una demanda energética menor o el incremento de la reutilización de materiales reciclados, se puede observar que esos materiales que estaban siendo menos utilizados vuelven a resurgir. Las necesidades de la sociedad también han ido cambiando y evolucionando por eso se están investigando y desarrollando nuevos usos de las fibras y sistemas constructivos que deben adaptarse a la situación actual.

El uso de fibras naturales o vegetales como material de construcción, en realidad, no tiene nada de innovador, es una técnica constructiva que ha sido muy empleada a lo largo de la historia. Lo más novedoso es la investigación de la incorporación de estas fibras en otros materiales más actuales para conseguir mejorar sus prestaciones, avanzar hacia un mundo más sostenible y volver a poner en auge el valor de las fibras naturales.

6.3 | CLASIFICACIÓN TIPOS DE FIBRAS

La palabra fibra tiene otras acepciones, se considera fibra la aglomeración de células en las que la longitud es mucho mayor que el diámetro. [22] Generalmente, se pueden agrupar en naturales o químicas. Dentro de cada categoría hay una gran cantidad de subcategorías que permiten su clasificación más específica.

Las fibras se pueden clasificar según distintos criterios como la longitud, la función o el origen. Dependiendo de la longitud que tengan después de haber sido procesadas se habla de fibras cortas o fibras largas. Según su función pueden ser fibras estructurales o no estructurales. Por último, según su origen se clasifican en naturales o químicas.

6.3.1 | FIBRAS CORTAS

Se puede conseguir partículas muy finas o fibras cortadas. Mediante procesos industriales, a partir de estas partículas, se puede obtener perfiles extruidos. A partir de las fibras cortadas, se puede realizar un proceso de impregnación de termocompresión mediante el cual se crean mantas de fibras no tejidas. [11]

6.3.2 | FIBRAS LARGAS

Las fibras largas se clasifican en dos grupos: roving y tejido. El roving, es el hilo de la fibra sometido a un proceso de enrollamiento de los filamentos. También se pueden obtener tejidos mediante procesos manuales o transferencia de resinas. [11]

Las fibras se pueden añadir de diversas formas (*Imagen 7*). Las fibras analizadas para la realización del estudio comparativo son fibras naturales cortas con una dirección aleatoria, es decir, desordenadas y añadidas en masa para reforzar el hormigón.

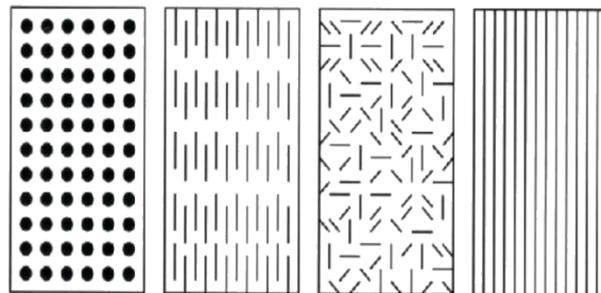


Imagen 7 // Composite reforzado con partículas, fibras cortas ordenadas, fibras cortas desordenadas y fibras largas. Imagen de comunidadbiomedica.

6.3.3 | FIBRAS ESTRUCTURALES

Son las fibras cuyas propiedades permiten que al ser incorporadas en el hormigón tengan una función estructural y por tanto es necesario su cálculo previo a la incorporación. La resistencia a esfuerzo cortante se ve incrementada cuando hay presencia de fibras con función estructural. Las fibras estructurales no pueden tener una disposición aleatoria, se deben incorporar a la mezcla siguiendo unos procesos que garanticen su correcta ubicación para un funcionamiento óptimo. [17]

6.3.4 | FIBRAS NO ESTRUCTURALES

Son las fibras que aportan unas determinadas cualidades al ser incorporadas en el hormigón pero que no influyen en el cálculo estructural. [17] Este es el caso de las fibras naturales estudiadas, mejoran las propiedades del hormigón, pero no tienen la función estructural que sí tienen las barras de acero.

6.3.5 | FIBRAS SEGÚN SU ORIGEN

FIBRAS	NATURALES	Orgánicas	Animales
			Vegetales
		Inorgánicas	Minerales
	QUÍMICAS	Orgánicas	Artificiales
			Sintéticas
		Inorgánicas	Vítreas Cristalinas

Tabla 1 // Clasificación general de las fibras según su origen. Tabla de elaboración propia a partir de [23].

6.3.6 | FIBRAS NATURALES

	ORIGEN	PROCEDENCIA	EJEMPLOS
	ANIMAL	Procedente de glándulas sedosas	Seda
		Procedente de folículos pilosos	Pelo
FIBRAS NATURALES	VEGETAL	Procedente de la semilla	Algodón
		Procedente del tallo	Lino, Cáñamo, Yute, Caña de azúcar
		Procedente de la hoja	Sisal
		Procedente del fruto	Coco
	MINERAL		Fibra de vidrio, fibra de carbono.

Tabla 2 // Clasificación fibras naturales según su origen y procedencia. Tabla de elaboración propia a partir de [24].

Las fibras se clasifican según su origen, que puede ser natural o químico, dentro de cada grupo se puede clasificar en diferentes subgrupos (Tabla 1). Son objeto del estudio las fibras naturales, por lo que se procede a una explicación más exhaustiva de algunas características generales de este tipo de fibras (Tabla 2).

En primer lugar, las fibras animales se componen de proteínas y son las que forman la cobertura que protege a los animales. Las fibras naturales vegetales, tienden a absorber una gran cantidad de agua.

Existen algunos tratamientos que se pueden aplicar sobre las fibras para protegerlas de efectos secundarios como el moho que puede surgir por el exceso de humedad. Por último, las fibras naturales no son termoplásticas, es decir, el calor aplicado no afecta a su deformación siempre que sea inferior a la temperatura a la que se descomponen, tampoco sufren grandes cambios de dilatación o retracción. [22]

6.3.7 | FIBRAS QUÍMICAS

Las fibras químicas (Tabla 3) no son objeto de este estudio, ya que se abarca únicamente la comparación de fibras naturales. Algunas de estas fibras también son utilizadas para el refuerzo de hormigones, como, las fibras de polipropileno.

		EJEMPLOS
ARTIFICIALES	Base proteínica	Fibroína, Alginato
	Base celulósica	Látex
	Base metálica	Oro, Plata
FIBRAS QUÍMICAS SINTÉTICAS	Por polimerización	Polivinilo, Polipropileno
	Por policondensación	Poliéster, Nylon
	Por poliadición	Poliuretano

Tabla 3 // Clasificación de las fibras químicas según su base o proceso de creación. Tabla de elaboración propia a partir de [24].

6.4 | COMPOSICIÓN

Los componentes básicos que se pueden observar al estudiar una fibra natural son la celulosa, lignina y hemicelulosa, dependiendo del tipo de fibra los porcentajes entre los componentes varían, por lo que, dependiendo de las características que se quiera obtener se debe elegir un tipo de fibra u otro ya que estas características son las que determinan la absorción de humedad de un material e incluso la resistencia mecánica que puedan presentar (Imagen 8). [11]

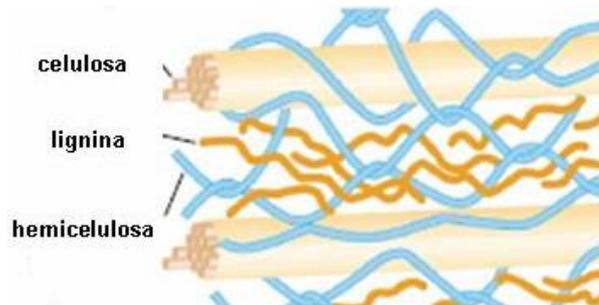


Imagen 8 // Componentes básicos que forman las fibras naturales. Imagen de Cerzos Conicet.

El porcentaje de celulosa presente en una fibra vegetal es el que determina la resistencia mecánica de la fibra y la lignina es la protección frente al medio ambiente. Se estudia el porcentaje de composición de las fibras para analizar los resultados y determinar si afecta a las propiedades que pueden aportar. [11]

7 | FIBRAS NATURALES VEGETALES

7.1 | FIBRA DE COCO

7.1.1 | MATERIA PRIMA

El coco es una fruta tropical que proviene del cocotero, *Cocos Nucifera* (Imagen 9), una planta que crece en las costas tropicales de Asia o América gracias a las condiciones climatológicas óptimas que se dan en esas áreas, favoreciendo su desarrollo. La planta, puede alcanzar un tamaño entre los diez y treinta metros y sus hojas tienen una longitud de hasta seis metros. Gracias a sus múltiples propiedades, además de la industria de la alimentación, el coco, también ha sido utilizado en otros sectores como la agricultura, ganadería, cosmética, decoración, artesanía o incluso la construcción ecológica. [25][26] El coco está formado por la copra, la carne blanca que se encuentra en la parte interior. Además, está cubierto por una cáscara dura que se encarga de protegerlo y por una capa fibrosa de la cual se extrae la fibra de coco. Por lo tanto, la fibra de coco es un subproducto derivado del procesamiento de la cáscara de coco. [25]



Imagen 9 // *Cocos Nucifera*. Imagen de Jardineriaon

Actualmente, la fibra de coco es muy utilizada en el sector agrícola porque sus propiedades la convierten en un buen sustituto del sustrato tradicional. El sector de la automoción también está bastante interesado en la investigación del uso de este tipo de fibras para mezclarlo con resinas y fabricar piezas. En cuanto al sector de la construcción hay varios estudios que analizan su incorporación como agregado del cemento para la mejora de prestaciones. [27]

7.1.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

La extracción de la fibra de coco (Imagen 10) se puede realizar de manera artesanal o mediante el uso de maquinaria especial. Primero, los cocos, se recogen manualmente después de haber estado en la planta entre cinco y seis meses, cada árbol puede dar entre cincuenta y cien cocos al año. Dependiendo de la maduración de los cocos se pueden recoger dos tipos de fibras. Las fibras marrones, menos flexibles, pero con mayor grosor y resistencia a la abrasión. El proceso para conseguir estas fibras es mediante el empleo de agua dulce. Las fibras claras, se extraen de cocos que aún no están completamente maduros, se trata de fibras más finas y lisas con menor resistencia.



Imagen 10 // Fibra de coco. Imagen de Agriculturers

En general, el proceso de extracción de la fibra de coco queda recogido en seis etapas. La primera consiste en la recolección de la materia prima, la segunda es el desfibrado, que consiste en separar las fibras que se pueden utilizar de las partes que no. Después, se procede a la fase de lavado, un proceso en el que se eliminan las sales presentes en las fibras utilizando agua de pH neutro. El cuarto paso es el secado y la desinfección de las fibras, sometiénolas a altas temperaturas y consiguiendo así un secado más rápido y la total esterilización. La siguiente fase es la de cribado y prensado, dos procesos en los que se consigue separar las fibras por tamaños, para eliminar las no deseadas y también se procede a prensarlas para su futura distribución en el formato deseado. Por último, las fibras se someten a un control exhaustivo para asegurar la calidad del resultado final. [27][28][29]

7.1.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
32 – 43	15 – 25	40 – 45

Tabla 4 // Porcentaje composición química de la fibra de coco. Tabla de elaboración propia a partir de [30].

7.1.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,11 – 0,53	680 – 1020	108 – 250	14 – 41

Tabla 5 // Propiedades físicas de la fibra de coco. Tabla de elaboración propia a partir de [17], [30] y [31].

7.1.5 | ENSAYOS

En 2006 se realizó un ensayo sobre el uso de fibra de coco, con la finalidad de comprobar y determinar la longitud y proporción de fibras necesarias para que se produjera una mejora de las propiedades mecánicas del hormigón. [13] Fue realizado en la Universidad de Colombia y se obtienen los siguientes datos y conclusiones:

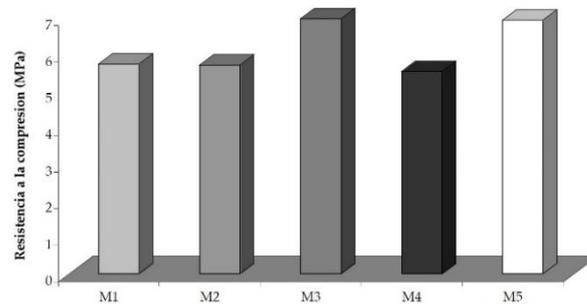
El ensayo realiza pruebas en laboratorio para comprobar la resistencia del hormigón reforzado con fibra de coco. Utiliza cuatro tipos de muestra alternando y cambiando la longitud de las fibras entre 2 y 5 centímetros y variando el porcentaje utilizado entre 0,5 y 1,5% (Tabla 6). Las compara con una muestra testigo de hormigón de elaboración propia que no contiene ninguna fibra. Para la elaboración del hormigón se emplea cemento Portland Tipo 1, arena mediana de río, grava de canto rodado de río de tamaño máximo 19 milímetros, agua potable y cal para blanquear. [13]

Mezcla N°	Longitud de la fibra (cm)	Volumen de la fibra (%)
M1	0	0
M2	L2	V0.5
M3	L2	V1.5
M4	L5	V0.5
M5	L5	V1.5

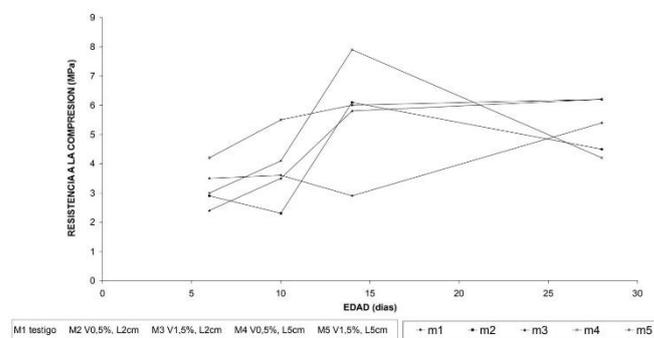
Tabla 6 // Nomenclatura, longitud y porcentaje de fibra añadido en las muestras para la realización de los ensayos de hormigón reforzado con fibra de coco. Tabla de [13].

En las pruebas de resistencia a compresión (Gráfica 1), se concluye que las únicas muestras que presentaban una resistencia superior a la muestra testigo eran las que contenían el porcentaje más elevado de fibra, siendo irrelevante la longitud de las fibras empleadas.

En el mismo ensayo, se determina que en el momento de la falla el hormigón se mantiene unido, por lo que se puede concluir que la adherencia de la fibra a la matriz es buena. [13]



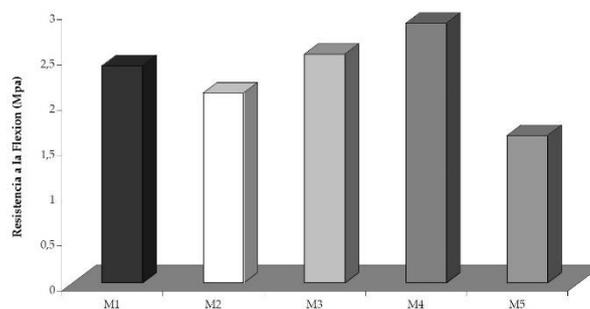
Gráfica 1 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de coco. Gráfica de [13].



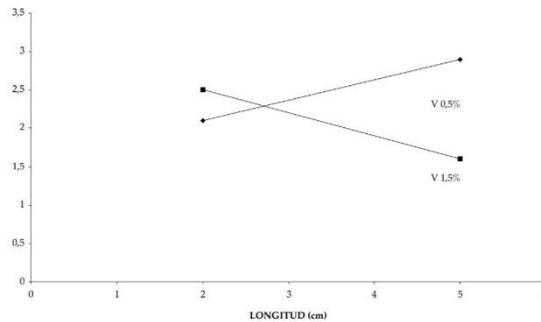
Gráfica 2 // Deformación máxima del hormigón reforzado con fibra de coco a lo largo del tiempo. Gráfica de [13].

Al analizar los resultados en el tiempo (Gráfica 2), se observa que el mejor comportamiento a corto plazo es de la muestra que contiene un menor volumen de fibra. Mientras que, a largo plazo la que mejor se comporta frente a la resistencia a compresión es la muestra M3, que contiene fibras de 2 centímetros de longitud y una proporción de fibra del 1,5% del volumen total de la muestra. [13]

En las pruebas de resistencia a flexión (Gráfica 3) las muestra que mejores resultados obtienen es M4, con una longitud de las fibras de 5 centímetros y una proporción de 0,5% sobre el volumen total de la mezcla. Se observa que la relación entre el porcentaje de fibra añadido y la longitud de las fibras es relevante en su comportamiento (Gráfica 4).



Gráfica 3 // Resultados del ensayo de resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra de coco. Gráfica de [13].



Gráfica 4 // Relación entre la longitud, el volumen añadido y la resistencia del hormigón reforzado con fibra de coco. Gráfica de [13].

Según otro ensayo realizado en la Universidad de Malasia, en la escuela de ingeniería de los materiales, se puede afirmar que la adición de fibra de coco aumenta de tres a dieciocho veces la resistencia a impacto, comparándola con una muestra sin fibra. En este estudio las muestras preparadas eran diferentes y revelan que aquellas con el 9% de fibra añadida eran las que presentaban el mayor módulo de rotura y la mejor resistencia a compresión. [32]

7.1.6 | VENTAJAS

- Buen equilibrio entre retención de agua y capacidad de aireación, evita la aparición de hongos.
- El proceso de obtención de la fibra no conlleva contaminación a la atmosfera.
- Su producción no consume energía.

7.1.7 | INCONVENIENTES

- Gran capacidad de absorción de agua.
- Tiene una elevada salinidad, por ser cultivado en zonas costeras por lo que es necesario el consumo de agua para su preparación antes de ser adheridas a la mezcla.

7.1.8 | CONCLUSIONES

En conclusión, la fibra de coco es una buena opción para el refuerzo de hormigón cuando se va a someter a esfuerzos de flexión. Para un uso adecuado es importante tener en cuenta la relación entre la cantidad de fibras añadidas y su longitud. Si se emplean fibras más largas el volumen añadido debe ser menor, mientras que si las fibras son cortas se incorpora un porcentaje mayor. [33]

7.2 | FIBRA DE YUTE

7.2.1 | MATERIA PRIMA

El yute es una planta herbácea tropical fibrosa conocida como *Corchorus Capsularis* (Imagen 11). Esta planta suele tener una altura entre los tres y cuatro metros y unos centímetros de diámetro. Las medidas de sus hojas rondan los quince centímetros de largo por cinco de ancho. Lo realmente interesante de esta planta es el tallo ya que es de donde se extrae la fibra de yute. Para su cultivo es necesario un clima cálido y húmedo y el terreno debe ser aluvial o arcillo-arenoso. Crece en países subtropicales de Asia y su cultivo no requiere más agua que la de la lluvia. [34]



Imagen 11 // *Corchorus Capsularis*.
Imagen de Elyute.

Es un cultivo que necesita pocos fertilizantes y plaguicidas por lo que es respetuoso con el medio ambiente. Aproximadamente por cada hectárea cultivada se puede obtener dos toneladas de yute seco, es la segunda fibra más producida después del algodón. Actualmente el uso de esta fibra está dedicado en la industria textil, siendo una de las fibras más importantes utilizada mundialmente, se utiliza para reforzar paquetes de embalaje, en cosméticos, pinturas y en algunos países también se utiliza como vallado o como material de combustión. [35], [36]

Actualmente hay varias líneas de investigación en este material como sustituto de las fibras de madera empleadas en diversas industrias, pero todavía representa un porcentaje muy pequeño del uso total.

7.2.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

La planta se encuentra lista para su extracción un mes después de florecer, antes de que los frutos maduren, hecho que se da a los tres o cuatro meses de ser plantado. El proceso para recogerlo es cortar los tallos a la altura del suelo. Cuando se han cortado las plantas se procede a atarlas en haces y se dejan secar. Una vez están secas se eliminan las hojas y se quitan los excesos de ramas. Por último, para completar el proceso de extracción de la fibra (Imagen 12) se separan las partes leñosas de las fibras de yute, proceso que se tiene que realizar a una temperatura de treinta grados centígrados. Las fibras resultantes tienen entre uno y cuatro metros y se almacenan en balas. [34]



Imagen 12 // Fibra de yute. Imagen de
Material Innovador.

La extracción se puede realizar por procesos químicos o biológicos, los químicos prácticamente no se utilizan por el elevado coste de los productos necesarios. El enriado se realiza mediante una técnica que sumerge los tallos para separar las fibras antes del arrancado. El arrancado es el proceso que consiste en raspar la materia no fibrosa y extraer las fibras del interior del tallo. [35]

7.2.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
61 – 71	14 – 20	12 – 13

Tabla 7 // Porcentaje composición química de la fibra de yute. Tabla de elaboración propia a partir de [30].

7.2.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,1 – 0,2	1030	230 – 350	1,7 – 1,8

Tabla 8 // Propiedades físicas de la fibra de yute. Tabla de elaboración propia a partir de [17].

7.2.5 | ENSAYOS

En 2017 en la Universidad Politécnica Salesiana de Quito se realizó un ensayo sobre la influencia del uso de fibra de yute en el refuerzo de hormigones, con la finalidad de comprobar su resistencia y analizar si existe relación entre el porcentaje de fibra empleado y los resultados obtenidos. [37] Se extraen los siguientes datos y conclusiones:

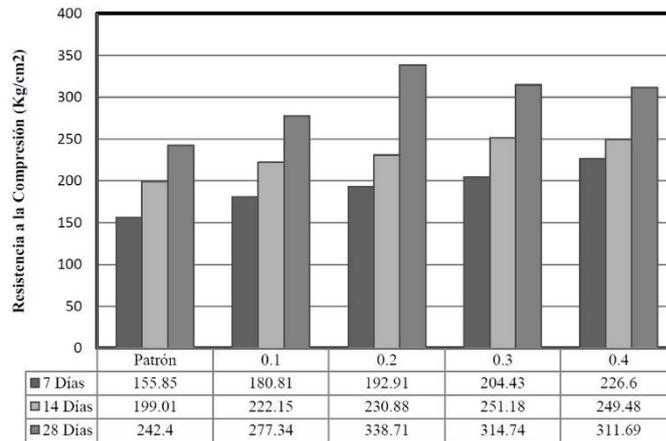
Para fabricar el hormigón del ensayo se utiliza un cemento estándar, áridos con un tamaño máximo nominal de 19 milímetros, arena, agua potable y las fibras de yute. Se fabrican cinco probetas con distinto porcentaje de fibra (Tabla 9). El ensayo analiza resultados tanto de resistencia a compresión como a flexión. [37]

En las pruebas de resistencia a compresión se observa que, con cualquier porcentaje de fibra añadido, el incremento de la resistencia es bastante considerable comparándolo con la muestra patrón. El mejor comportamiento lo tiene la muestra con una longitud de fibra de 3 centímetros y un porcentaje de adición del 0,2% (Gráfica 5).

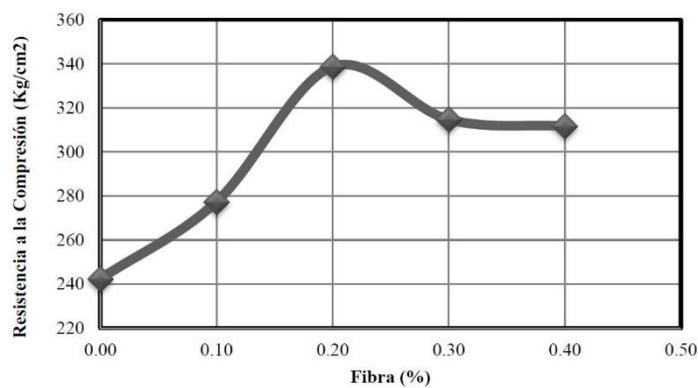
Identificación	Longitud de la fibra (cm)	Porcentaje de fibra respecto al volumen total de la mezcla (%)
TYP	0	0
TY1	3	0.1
TY2	3	0.2
TY3	3	0.3
TY4	3	0.4

Tabla 9 // Nomenclatura, longitud y porcentaje de fibra añadido en las muestras para la realización de los ensayos de hormigón reforzado con fibra de yute. Tabla de [37]

El comportamiento de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de yute mejora a largo plazo, ya que los valores del ensayo realizado a los 28 días son mejores que los resultados a los 7 días. Se puede observar que a partir del 0,2% de fibra añadido, continuar incrementando la adición sería contraproducente ya que la resistencia mecánica a compresión del hormigón reforzado disminuye (Gráfica 6). [37]

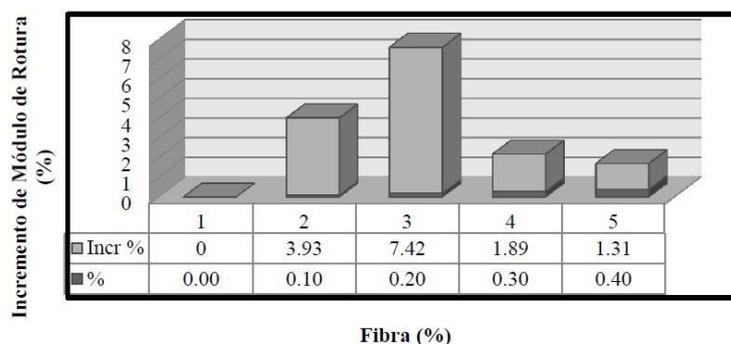


Gráfica 5 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de yute. Gráfica de [37].

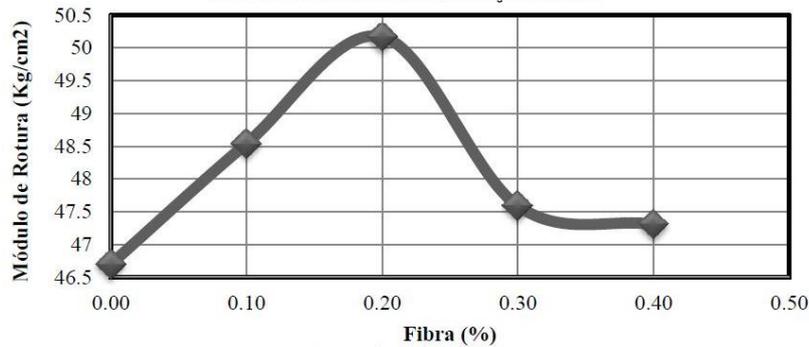


Gráfica 6 // Resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de yute según el porcentaje de fibra añadido a los 28 días. Gráfica de [37].

En las pruebas de resistencia a flexión, el incremento del módulo de rotura no es extremo, pero sí relevante. Únicamente se analiza el comportamiento de la muestra a los 28 días. En este caso, la adición de un 0,2% de fibra sobre el volumen total de la mezcla, también es la proporción más efectiva para conseguir un rendimiento adecuado del hormigón reforzado con fibra de yute (Gráfica 7). El incremento del porcentaje de fibra añadido después del 0,2% es muy desfavorable ya que la resistencia a flexión disminuye drásticamente (Gráfica 8). [37]



Gráfica 7 // Resultados del ensayo de resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra de yute. Gráfica de [37].



Gráfica 8 // Módulo de rotura a flexión según porcentaje de fibra de yute añadido. Gráfica de [37].

7.2.6 | VENTAJAS

- Es 100% biodegradable y reciclable.
- Una hectárea de este cultivo consume quince toneladas de dióxido de carbono y libera once de oxígeno.
- Su cultivo enriquece la fertilidad del suelo para otras cosechas.
- Su combustión no genera gases tóxicos.
- Tiene propiedades aislantes y antiestáticas.
- Baja conductividad térmica.
- Retención de humedad moderada.
- Resistente a la radiación.

7.2.7 | INCONVENIENTES

- En ambientes húmedos puede desarrollar alguna patología.
- El transporte desde las zonas de producción puede ser costoso.

7.2.8 | CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas de la fibra de yute son que, según los ensayos estudiados, es una buena opción para el refuerzo de hormigón ya que mejora tanto la resistencia a compresión como la resistencia a flexión. Los métodos de obtención de esta fibra también son bastante interesantes ya que respetan el medio ambiente, al provenir de una fuente renovable y con un crecimiento rápido su consumo se puede producir de una forma consciente y responsable.

7.3 | FIBRA DE ALGODÓN

7.3.1 | MATERIA PRIMA

El algodón es la planta que se obtiene de un arbusto de la clase *Gossypium* (Imagen 13). Las zonas en las que está más extendido su cultivo son América Central, Sudamérica, el noroeste de África y el suroeste de Arabia. Generalmente su tamaño es inferior a los tres metros. Las flores nacen en pequeñas agrupaciones de tres a siete unidades, pero lo realmente interesante es el fruto del cual brotan las fibras de algodón que suelen tener entre veinte y cuarenta y cinco centímetros. La planta suele empezar a florecer a los veinticinco días, pero puede llegar a demorarse hasta ochenta y cinco días. [38][39]



Imagen 13 // *Gossypium*. Imagen de infocampo.

El algodón ha sido utilizado como fibra textil durante miles de años, llegando a ser la fibra más importante de esta industria. Algunas particularidades de esta planta son que necesita un clima muy cálido y mucha agua para su cultivo, normalmente no es suficiente con la de la lluvia de las regiones en las que se cultiva por lo que no es una fibra totalmente sostenible.

Actualmente, además de en la industria textil, la fibra de algodón también se utiliza para la creación de cosméticos, para crear artículos domésticos, filtros de aire, se mezcla con otras fibras no naturales para hacer carpas, neumáticos, piscinas, redes o incluso pólvora. [40]

7.3.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

El proceso para para la obtención de fibras de algodón (Imagen 14) consiste en varios pasos. El primero es la cosecha, normalmente se realiza mecánicamente con maquinaria especializada, aunque todavía hay regiones en las que se continúa recogiendo a mano. Después, se procede al secado que ayuda a facilitar el siguiente proceso. La separación consiste en extraer las fibras del resto de los elementos de la planta como las hojas, tallos y semillas. [39]



Imagen 14 // Fibra de algodón. Imagen de kramynia

Normalmente, si no se va a destinar el algodón a la industria textil, antes de generar los hilos, se agrupan las fibras en pacas que se clasifican dependiendo de la longitud de fibra para su posterior venta y distribución. Cuando ya se han obtenido las fibras en bruto se procede a su hilado para agrupar los filamentos y formar hilos, este proceso se puede realizar mecánicamente o artesanalmente. Son las empresas textiles las que se encargan de crear los hilos que necesiten para los productos que vayan a fabricar. [40] [41]

En cuanto al refuerzo del hormigón, el uso de la fibra de algodón todavía no está muy extendido. Se trata de una fibra compuesta por un gran porcentaje de celulosa por lo que no es un candidato óptimo debido a la gran absorción de agua. Anualmente, grandes cantidades de fibra de algodón se acumulan en todo el mundo sin ningún uso, generando un problema ambiental que puede llegar a suponer una amenaza para la salud. Estos desechos podrían ser utilizados con otros fines como el refuerzo de hormigón. [42]

7.3.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
90	5	5

Tabla 10 // Porcentaje composición química de la fibra de algodón. Tabla de elaboración propia a partir de [11].

7.3.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,12 – 0,22	1540	287 – 800	3,0 – 7,0

Tabla 11 // Propiedades físicas de la fibra de algodón. Tabla de elaboración propia a partir de [39] y [40].

7.3.5 | ENSAYOS

Para comprobar los efectos de la fibra de algodón utilizada como refuerzo del hormigón se consulta un ensayo realizado en el Departamento de Mecánica Aplicada de la Universidad de Dahod en India, en el año 2014 [42].

El objetivo del ensayo era determinar el efecto que provoca la incorporación de fibra de algodón y humo de sílice en el comportamiento del hormigón frente a la resistencia a flexión y compresión. En este caso, el estudio analiza la fibra de algodón para la utilización de una fibra natural que ayude a generar un *green composite* y el humo de sílice, porque según otros estudios realizados previamente su sustitución por cemento mejora considerablemente el comportamiento del hormigón. [42]

Para la realización del ensayo se realizan pruebas con diferentes cantidades de fibra de algodón, entre un 0,2% y un 0,4% del volumen total de la muestra, con una longitud de tres centímetros. También se sustituye la adición de cemento por distintos porcentajes de humo de sílice, cantidades que oscilan entre el 3% y el 12%. Se exponen los resultados de las combinaciones de muestras con mejores valores (Tabla 12). Para la comparación de los resultados, posteriormente, se toman los valores de la muestra sin porcentaje de humo de sílice. [42]

El hormigón utilizado está hecho con cemento Portland, agregados finos con un tamaño máximo de 4,75 mm, agregados gruesos con un tamaño máximo de 20 mm, agua y un superplastificante para mejorar su trabajabilidad.

Los resultados del ensayo muestran que solo con la adición de fibra de algodón de un 0,4% del volumen total, la resistencia a compresión mejora un 8% respecto a la muestra sin reforzar. [42] Por lo tanto, se puede determinar que los valores de resistencia a compresión del hormigón patrón son 24,5 Mpa.

	RESISTENCIA A COMPRESIÓN		RESISTENCIA A FLEXIÓN
	7 DÍAS	28 DÍAS	28 DÍAS
0,4 % FIBRA 0 % HUMO	18,96 MPa	26,46 MPa	5,30 MPa
0 % FIBRA 9 % HUMO	20,31 MPa	28,96 MPa	5,74 MPa
0,2 % FIBRA 9 % HUMO	19,52 MPa	27,70 MPa	5,18 MPa
0,4 % FIBRA 6 % HUMO	19,43 MPa	27,19 MPa	5,54 MPa

Tabla 12 // Resultados del ensayo de refuerzo con fibras de algodón y humo de sílice. Tabla de elaboración propia a partir de [40].

La resistencia a flexión también incrementa un 10,4% respecto a la muestra patrón, que en este caso tiene un valor de 4,8 MPa. La adición del 0,4% es la proporción con mejores resultados obtenidos de las combinaciones propuestas.

El estudio también revela que, añadiendo un 0,4% de fibra de algodón y sustituyendo un 6% de cemento por humo de sílice, se consigue un incremento de la resistencia a flexión de un 15,41%. Sin embargo, los resultados del incremento de resistencia a compresión no son demasiado relevantes, simplemente decrece la facilidad de trabajo del hormigón. [42]

7.3.6 | VENTAJAS

- Es una materia prima abundante.
- Por sus características físicas es un buen aislante térmico.
- Cuando se moja su resistencia puede aumentar hasta un 15%

7.3.7 | INCONVENIENTES

- El cultivo de la fibra de algodón necesita grandes cantidades de agua por lo que no es una opción ecológica y sostenible.
- Es sensible a los microorganismos.
- Tiene alta higroscopicidad, cuando se moja la fibra puede llegar a aumentar su volumen hasta un 40%

7.3.8 | CONCLUSIONES

Las conclusiones del uso de algodón como fibra sostenible para el refuerzo de hormigón son que, en realidad, es una de las fibras naturales menos sostenible por la excesiva cantidad de agua necesaria para su cultivo. A pesar de eso, los resultados expuestos en el ensayo muestran que es una buena opción para el refuerzo de hormigón. También se puede concluir de este apartado que una posible sustitución del cemento podría residir en el uso de otro tipo de fibras naturales minerales como el humo de sílice.

7.4 | FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

7.4.1 | MATERIA PRIMA

La caña de azúcar es una planta también conocida como *Saccharum officinarum* (Imagen 15). El tallo de la caña de azúcar tiene entre dos y cinco metros de altura, un diámetro entre cinco y seis centímetros y no tiene ramificaciones. Las hojas se encuentran en la parte más elevada y son largas, delgadas y planas. Su cultivo se produce en muchos países, pero los de mayor producción son India, China y Tailandia. En España también se cultiva a menor escala en las zonas de Málaga y Motril. [43]



Imagen 15 // *Saccharum officinarum*.
Imagen de Agronews Castilla y León.

Para un correcto desarrollo del cultivo la temperatura mínima a la que se debe someter es entre 14 y 16°C, aunque la temperatura óptima de cultivo se encuentra entre los 32 y 38°C, no soporta las heladas. Los países con mayor producción son los que, además de tener esas temperaturas durante la mayor parte del año, también tienen una humedad relativa alta. El suelo con mejores cualidades para su plantación es un suelo ligero y preferiblemente sin acidez o cal ya que podría generar daños en la planta. [43] [44] De la caña de azúcar, además de la fibra o el bagazo se pueden extraer otros componentes para producir sacarosa, azúcar blanco, azúcar moreno, ceras o abono. [43]

7.4.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

La recolección de la caña de azúcar para la extracción de su fibra (Imagen 16) se puede hacer de dos formas: en verde o tras la quema, ambas se pueden llevar a cabo a su vez de forma manual o mediante el uso de la maquinaria específica necesaria. La forma más común de recolección es tras la quema ya que es más efectiva para obtener una fibra libre de impurezas, pero esta técnica es muy agresiva con el medio ambiente ya que además de liberar gases nocivos a la atmosfera también perjudica la tierra en la que ha sido cultivado. Se debe intentar que la recolección se haga en verde, pero para que este método sea rentable la caña debe tener la menor cantidad de impurezas antes de la recolección. [43]



Imagen 16 // Fibra de caña de azúcar.
Imagen de Thamizhparathi.

El proceso de recolección manual se puede llevar a cabo mediante dos tipos de corte de la caña. El corte convencional, consiste en cortar la caña por la base, después eliminar las hojas de la punta y prepararlo para su transporte. El corte limpio, se trata de un tipo de corte en el que primero se eliminan las hojas del tallo y después se corta por la base, después se prepara para su transporte. Si, por el contrario, el proceso se hace mecánicamente, es la cosechadora la que se encarga tanto de cortar la caña por la base y despuntar los tallos como de cortarlos en trozos más pequeños y eliminar las hojas. [43]

Lo que se necesita obtener es el bagazo de la caña de azúcar, que es el residuo que queda después de la extracción del azúcar de la caña. Actualmente este bagazo es utilizado en algunos países para la producción de papel o papel reciclado. Antes de poder emplear la fibra se debe tratar con un proceso de lavado y secado que elimine las impurezas no deseadas ya que la presencia de azúcar podría ser contraproducente en el hormigón. [43]

7.4.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
50	24	14

Tabla 13 // Porcentaje composición química de la fibra de caña de azúcar. Tabla de elaboración propia a partir de [44].

7.4.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,15 – 0,25	310 – 410	220 – 290	-

Tabla 14 // Propiedades físicas de la fibra de caña de azúcar. Tabla de elaboración propia a partir de [45].

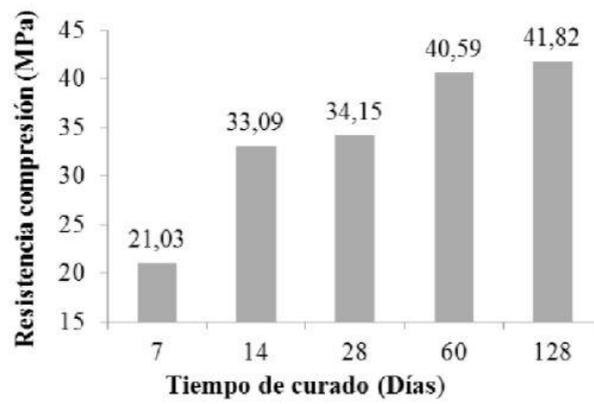
7.4.5 | ENSAYOS

Para comprobar los efectos de la fibra de caña de azúcar como refuerzo de hormigón se estudia un artículo científico publicado en la revista Ingeniería UC, desarrollado por la Universidad de Carabobo en Venezuela. Para la realización del ensayo se utilizan distintas probetas, una muestra patrón sin ninguna fibra añadida y otras con un porcentaje de bagazo de caña de azúcar equivalente al 2,5% del volumen total de la mezcla. Los materiales utilizados para la creación del hormigón son cemento Portland, grava, arena, agua, fibra de bagazo de caña de azúcar y un aditivo químico que aumenta la manejabilidad de la mezcla. Se hicieron pruebas con distintas longitudes de fibra una de tres a cuatro centímetros, consideradas como las muestras cortas, y la otra muestra con fibras de cinco a seis centímetros, fibras largas. También se realiza una muestra en la que se añaden fibras tratadas previamente mediante un proceso químico que las protege. [46]

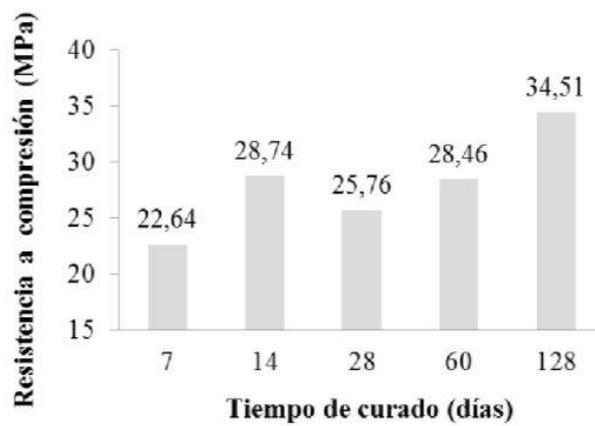
El ensayo a compresión muestra los siguientes resultados. Los valores de la resistencia a compresión de la mezcla patrón, que son con los que se comparan los resultados de las otras muestras son los representados en (Tabla 15). Se observa que las muestras que contienen las fibras largas, doblan su capacidad de resistencia transcurridos sesenta días desde la realización del ensayo (Gráfica 9). La muestra que contiene la fibra corta tiene un peor comportamiento a largo plazo y un comportamiento más inestable durante el proceso (Gráfica 10). [46]

	Tiempo de curado (días)				
	7	14	28	60	128
Resistencia a la compresión (MPa)	34,32	37,09	40,08	41,27	43,35

Tabla 15 // Valores de resistencia a compresión de la muestra patrón del ensayo de hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar. Tabla de [46].

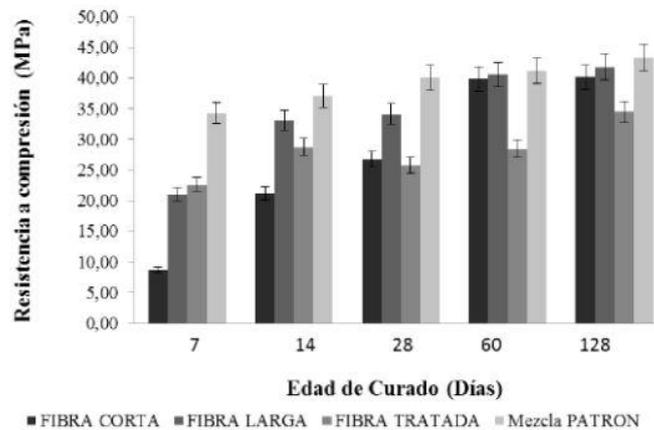


Gráfica 9 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar larga. Gráfica de [46].



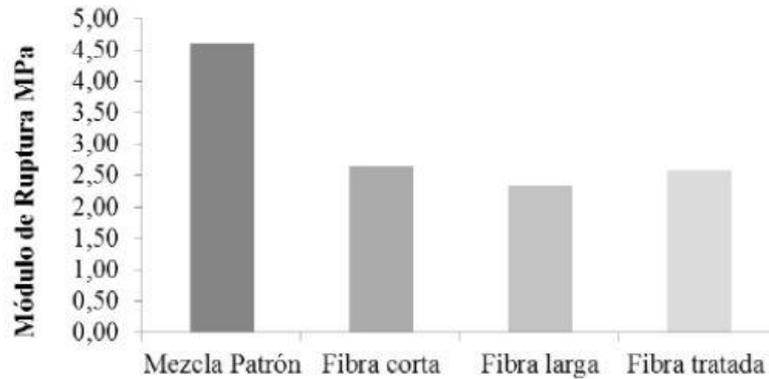
Gráfica 10 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar corta. Gráfica de [46].

Sin embargo, al comparar los resultados de las muestras con los de la mezcla patrón se observa que son unos resultados desfavorables ya que la resistencia a compresión soportada es inferior en el caso de las muestras reforzadas (Gráfica 11). [46]



Gráfica 11 // Comparativa de los resultados ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar. Gráfica de [46].

Los resultados del ensayo a flexión también son bastante desfavorables. El comportamiento a los 28 días de las muestras reforzadas con fibras tanto largas como cortas tienen unos valores de resistencia a flexión inferiores a los de la muestra sin ningún tipo de refuerzo (Gráfica 12). Los resultados de la fibra tratada son ligeramente superiores, pero siguen siendo inferiores a la muestra patrón. [46]



Gráfica 12 // Resultados ensayo a flexión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar. Gráfica de [46].

7.4.6 | VENTAJAS

- Es resistente a plagas y enfermedades.
- Su producción es alta, se consiguen grandes cantidades de caña por hectárea plantada.
- Bajo porcentaje de inflorescencias.

7.4.7 | INCONVENIENTES

- El cultivo de la caña de azúcar necesita tener un especial cuidado en el abono, ya que absorbe los nutrientes del suelo muy rápidamente.
- Si la cosecha es después de la quema se produce un gran impacto ambiental.

7.4.8 | CONCLUSIONES

La fibra de caña de azúcar no es una opción óptima para el refuerzo de hormigón ya que los valores obtenidos en los ensayos no son mejores que los de la muestra patrón. Esto puede deberse a una pobre adición de la fibra con la matriz.

7.5 | FIBRA DE CÁÑAMO

7.5.1 | MATERIA PRIMA

La fibra de cáñamo se obtiene a partir de la planta de *Cannabis Sativa* (Imagen 17). El cáñamo industrial contiene menos de un 0,3% de THC y no es psicoactivo por lo que su cultivo es legal. La producción de cáñamo industrial necesita cumplir algunos requisitos que ayuden al desarrollo de los tallos de la planta además de incrementar su altura. A pesar de eso, su cultivo es fácil y es considerado uno de los que menos perjudica al medio ambiente ya que no necesita herbicidas, pesticidas, ni fertilizante, además, su cultivo tiene una menor necesidad de agua que otras plantaciones de características similares. La fibra de cáñamo es una de las partes más importantes de esta planta, se encuentra en la parte interior del tallo que puede alcanzar los cuatro metros de altura. [47]



Imagen 17 // *Cannabis Sativa*. Imagen de Casanare.

Los principales productores de cáñamo a nivel mundial son Australia, Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Vietnam y Francia. Dependiendo de las condiciones de entorno en las que crezca la planta se obtiene una fibra más o menos resistente. Actualmente los usos de la fibra de cáñamo son muy amplios, se puede encontrar este material en industrias como la textil, alimentaria y cosmética. También se utiliza en la elaboración de una gran cantidad de plásticos o como combustible. Se puede utilizar para crear filtros, ya que es una fibra muy resistente especialmente cuando crece en condiciones húmedas. En cuanto al sector de la construcción el uso de la fibra de cáñamo ya es una realidad, se puede encontrar en muchos materiales de construcción como aislamiento, productos de conglomerado, cartón e incluso en forma de bloques que sustituyen al hormigón. [48]

7.5.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

El proceso para extraer la fibra de cáñamo (Imagen 18) consiste en varios pasos. El primero, es la recolección, se puede realizar de forma mecánica o con maquinaria especializada. Una vez se han cortado las plantas se preparan para el enriado, un proceso mediante el cual se maceran las fibras sumergiéndolas en agua, también se pueden dejar secar en el suelo para que se separen. A pesar de que ese proceso es más lento, las ventajas ecológicas de ahorro de agua son evidentes. En este transcurso de tiempo lo que sucede es que uno de los componentes que mantiene las fibras unidas, la pectina, se descompone por estar expuesta a la luz y el aire dejando libres las fibras de cáñamo. [47]



Imagen 18 // Fibra de cáñamo. Imagen de Aimplas

El siguiente paso también puede ser manual o mecánico y consiste en la eliminación del núcleo leñoso del tallo. Si se va a realizar manualmente, es mejor que la planta esté húmeda para facilitar la extracción y después proceder al secado. Sin embargo, si se produce mecánicamente la maquinaria se encarga de ambos procesos de manera simultánea. Una vez las fibras están separadas, se forman fardos y se preparan para su distribución a las distintas industrias que se encargarán de procesarlas de manera que se adapten a las necesidades de sus productos, ya sea creando hilos, tejiendo las fibras o realizando otros procesos. [47]

7.5.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
65 – 75	16 – 18	8 – 10

Tabla 16 // Porcentaje composición química de la fibra de cáñamo. Tabla de elaboración propia a partir de [11] y [47].

6.9.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,1 – 0,3	1480	285	1,6

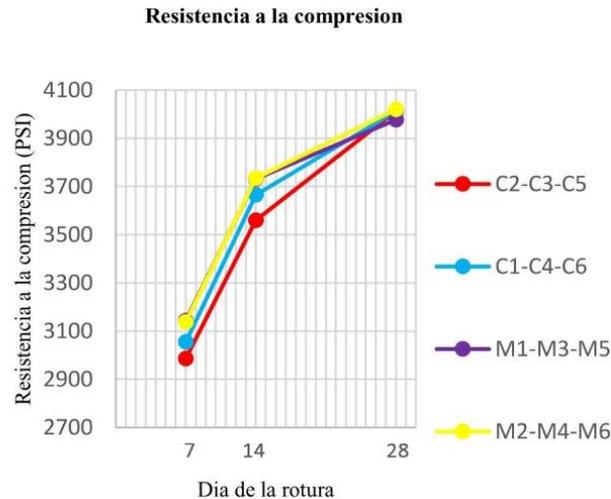
Tabla 17 // Propiedades físicas de la fibra de cáñamo. Tabla de elaboración propia a partir de [49] y [50].

7.5.5 | ENSAYOS

Para comprobar los efectos de la fibra de cáñamo como material de refuerzo del hormigón, se analiza un estudio realizado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia. La investigación determina las propiedades mecánicas de un hormigón reforzado con fibra de cáñamo. Para la realización de los ensayos a compresión se preparan seis muestras que incorporan fibra de cáñamo y otras seis que no lo hacen. El objetivo es comparar los resultados de comportamiento a lo largo del tiempo. Para los ensayos a flexión solo se realizan dos muestras, una reforzada y otra sin refuerzo. Se comprueba su resistencia a flexión a los 28 días. Los materiales utilizados para la realización del hormigón son cemento Portland Tipo 1, agregados finos y gruesos, cal hidratada y agua potable. La cantidad de fibra añadida es del 1% respecto al volumen total de las muestras y la longitud de las fibras utilizadas es de cuatro a cinco centímetros. [51]

Los resultados del ensayo a compresión (*Gráfica 13*) muestran que, a pesar de la buena tendencia de los resultados en los primeros días, no hay un incremento significativo de la resistencia a largo plazo del hormigón reforzado con la fibra de cáñamo comparado con el no reforzado. Los valores obtenidos son una resistencia a compresión de 28,3 MPa en la muestra reforzada con cáñamo y 26,8 MPa en la muestra patrón. La principal mejora es que al producirse la rotura el hormigón no se desprende por la adición de la fibra a la matriz. [51]

Las muestras M1, M2, M3, M4, M5 y M6 son las reforzadas con fibra de cáñamo de distintas longitudes, se elaboran seis para poder estudiar su comportamiento en tres fases temporales distintas. C1, C2, C3, C4, C5 y C6 son las muestras de hormigón sin reforzar.



Gráfica 13 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de cáñamo. Gráfica de [51].

Los resultados del ensayo a flexión muestran un aumento favorable de la resistencia tanto a flexión como al agrietamiento, por lo que se considera que la fibra de cáñamo tiene una buena adherencia con el hormigón. Los valores obtenidos para la resistencia a flexión de la muestra con fibra de cáñamo son 3,9 MPa, mientras que para el hormigón patrón no da un valor de resistencia a flexión. Los porcentajes del módulo de rotura se encuentran entre los valores aceptados normativamente. [51]

7.5.6 | VENTAJAS

- Muy resistente en condiciones húmedas.
- Tiene una alta resistencia a los esfuerzos de tracción.
- Tiene propiedades antibacterianas.
- Buena adherencia con el hormigón.

7.5.7 | INCONVENIENTES

- Necesita la adición de aditivos para mejorar la fluidez y trabajabilidad.

7.5.8 | CONCLUSIONES

Cuando se produce la rotura por los esfuerzos de compresión las fibras consiguen mantener el hormigón adherido, por lo que la falla la produce el hormigón, las fibras podrían resistir una carga mayor. Ocurre lo mismo con la rotura por los esfuerzos de flexión, los resultados obtenidos de resistencia son mejores y la falla de la viga ensayada es parcial, siendo las fibras las que mantienen la estabilidad. Por lo tanto, la fibra de cáñamo ayuda a reducir el agrietamiento del hormigón mediante un fenómeno conocido como puenteo que se encarga de impedir el avance de las fracturas cuando se producen. Esta fibra sería un buen añadido en hormigones sin función estructural ya que las propiedades mejoran, pero las resistencias no. [51]

7.6 | FIBRA DE LINO

7.6.1 | MATERIA PRIMA

La fibra de lino se obtiene a partir de la planta *Linum usitatissimum* (Imagen 19). Es una planta que se cultiva mucho en Europa, pero se puede encontrar también en países como Canadá, Egipto o algunas zonas de Sudamérica porque su cultivo es apto para casi cualquier clima. La cualidad más importante de este cultivo son sus semillas, utilizadas en una gran cantidad de industrias y con múltiples fines. Los terrenos arcillo-silíceos son los mejores para su cultivo siempre que se evite un exceso de humedad. Esta planta normalmente alcanza los sesenta centímetros de altura y es de cultivo anual. [52]



Imagen 19 // *Linum usitatissimum*.
Imagen de tus plantas medicinales.

En cuanto a las necesidades de abonos especiales, el cultivo de lino no es demasiado exigente, pero si se quiere conseguir una fibra con mejores propiedades, es necesario reforzar los abonos potásicos. [53] Si lo que nos interesa de la planta son las propiedades de la fibra, lo mejor es cultivarlo en latitudes templadas, zonas con veranos moderados y húmedos como los de Centroeuropa. [54]

Se debe prestar atención y evitar las sequías, ya que, si el terreno se quiebra, la planta no florecerá adecuadamente. Sus raíces son cortas y el interior de sus tallos está hueco, de ellos es de donde se extrae la fibra que principalmente tiene un uso textil. [53]

7.6.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

Para obtener la fibra de lino (Imagen 20) se sigue un proceso prácticamente igual al de la extracción de la fibra de cáñamo. El primer paso después de la recolección, que puede ser manual o mecanizada, es el desgrane. Este proceso consiste en extraer las semillas de la planta y se tiene que realizar de forma mecánica. Después, se peinan las fibras con la finalidad de separar las fibras cortas de las largas, además de eliminar las posibles impurezas o cualquier otra materia que no sea necesaria. Las fibras largas se juntan en manojos para su posterior secado.



Imagen 20 // Fibra de lino. Imagen de
Baltic Flax.

Por último, se preparan las fibras para distribución en su estado natural una vez secadas o se pueden continuar procesando extendiendo los manojos en la maquinaria adecuada para conseguir hilos. Este proceso se realiza normalmente en las fábricas de la industria textil que tienen maquinaria especializada. [55], [56]

7.6.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
62 – 71	16 – 18	2 – 2,5

Tabla 18 // Porcentaje composición química de la fibra de lino. Tabla de elaboración propia a partir de [11].

7.6.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,12 – 0,16	1500	450 – 1100	2,7 – 3,2

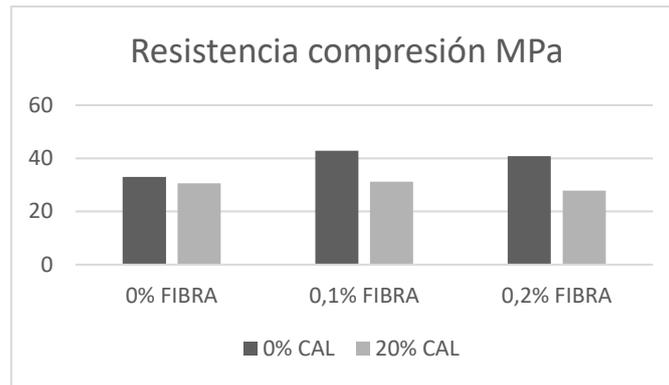
Tabla 19 // Propiedades físicas de la fibra de lino. Tabla de elaboración propia a partir de [49] y [54].

7.6.5 | ENSAYOS

Para comprobar los efectos de la fibra de lino como material de refuerzo del hormigón, se analizan dos estudios, el primero realizado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Bani Walied en Libia. Este ensayo se enfoca en el uso de este material para elementos esbeltos de una altura considerable. [57] El segundo realizado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada [58]. Se analizan ambos estudios ya que las conclusiones de uno complementan los ensayos y las gráficas realizados en el otro.

La investigación determina las propiedades mecánicas de un hormigón autocompactante reforzado con fibra de lino. Se lleva a cabo un estudio dividido en dos fases. En la primera fase, se investiga el efecto de añadir la fibra de lino en dos muestras de hormigón, una de hormigón autocompactante y otra en la que se sustituye un 20% de cemento por cal. Se calcula aproximadamente el porcentaje de fibra añadido en las probetas, según el peso total añadido de fibra, y se concluye que se añade un 0,1% y 0,2% del volumen total de la mezcla. La diferencia principal de este ensayo en comparación con los otros estudiados es que en este caso el hormigón no es un hormigón convencional, sino autocompactante. No se especifican los materiales empleados para la preparación del hormigón. En la segunda fase se determinan otras propiedades como la homogeneidad o la distribución del agregado en las muestras. [57] El segundo estudio muestra que la longitud de fibra de lino para conseguir resultados óptimos es tres centímetros. [58]

Los resultados del ensayo a compresión muestran que, la mejor opción es la adición de 0,1% de fibra y no sustituir el cemento por la cal, ya que cuando se añade más fibra la resistencia a compresión disminuye (*Gráfica 14*).



Gráfica 14 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de lino. Gráfica de elaboración propia a partir de [57].

Esta investigación realiza ensayos para determinar otras propiedades y resistencias del hormigón reforzado con fibra de lino, pero no da resultados para la resistencia a flexión por lo que no se pueden exponer otras conclusiones.

7.6.6 | VENTAJAS

- Evita la proliferación de bacterias.
- Es resistente y duradero.
- Su cultivo es más sostenible que el del algodón porque requiere menos agua.
- Al ser cultivado en muchos países las emisiones producidas por el transporte son menores.

7.6.7 | INCONVENIENTES

- No se han detectado inconvenientes.

7.6.8 | CONCLUSIONES

La fibra de lino aporta resistencia y tenacidad al hormigón. La longitud óptima de fibra añadida es de tres centímetros. Según los resultados del ensayo la resistencia a compresión del hormigón se ve mejorada al añadir fibra de lino.

7.7 | FIBRA DE SISAL

7.7.1 | MATERIA PRIMA

La fibra de sisal se puede obtener a partir de la planta de *Agave sisalana* (Imagen 21). Esta planta tiene un periodo de crecimiento que oscila entre los siete y doce años, siendo posible la primera recolección aproximadamente a los dos años. La cantidad de fibra que produzca cada planta está directamente relacionada con las condiciones atmosféricas en las que se desarrolla. Los principales países de producción de sisal se encuentran en áreas con climas cálidos y zonas secas, que generalmente, no son aptas para otro tipo de cultivo. Por sus propiedades, la planta, tiene un mejor desarrollo en suelo seco que en uno húmedo. Los países con mayor producción son México, Tanzania, Kenia, Angola, Mozambique, Brasil, Haití e Indonesia. [59] [60]



Imagen 21 // *Agave sisalana*. Imagen de Camila Jurado.

El cultivo de esta planta se remonta varios siglos atrás, cuando algunas civilizaciones ya lo utilizaban para hacer telas y papel. Actualmente, la fibra de sisal es utilizada con una gran cantidad de fines, algunos países árabes la utilizan como refuerzo de yeso, la industria textil la utiliza para hacer hilos y con ellos crear cuerdas o elementos decorativos. También se crean productos de papel de alta calidad y se utiliza como refuerzo de materiales compuestos, por ejemplo, se puede incorporar en algunos plásticos para la fabricación de piezas de automóvil, puede convertirse también en paneles de fibra aislante. Sus residuos también son interesantes para la obtención de otros productos como materiales de construcción o biomásas. [60]

7.7.2 | EXTRACCIÓN DE LA FIBRA

La fibra de sisal (Imagen 22) se extrae de las hojas de la planta. Su contenido tiene aproximadamente un 90% de humedad que debe ser extraído para poder aprovechar el resto de la fibra. El aprovechamiento es bastante elevado ya que por cada hectárea de cultivo se puede extraer entre 1 y 2,5 toneladas de fibra.



Imagen 22 // Fibras de sisal. Imagen de Nikita Lysenko.

El proceso de extracción de la fibra consiste en una serie de procesos mecánicos. El primero es la recolección de la materia prima que se realiza con máquinas especializadas. Estas máquinas recolectoras también tienen la función de aplastar y raspar las hojas para extraer la fibra. Después, la fibra se lava y se seca, este proceso puede realizarse de manera manual o igual que todo el proceso de extracción, mediante el uso de maquinaria. Por último, se procede al cepillado de la fibra, que se trata de un proceso mecánico. [59]

7.7.3 | COMPOSICIÓN QUÍMICA

CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)
65	7 – 10	10

Tabla 20 // Porcentaje composición química de la fibra de sisal. Tabla de elaboración propia a partir de [20].

7.7.4 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,2 – 0,4	1450	444 – 552	2,0 – 2,5

Tabla 21 // Propiedades físicas de la fibra de sisal. Tabla de elaboración propia a partir de [49], [50] y [59].

7.7.5 | ENSAYOS

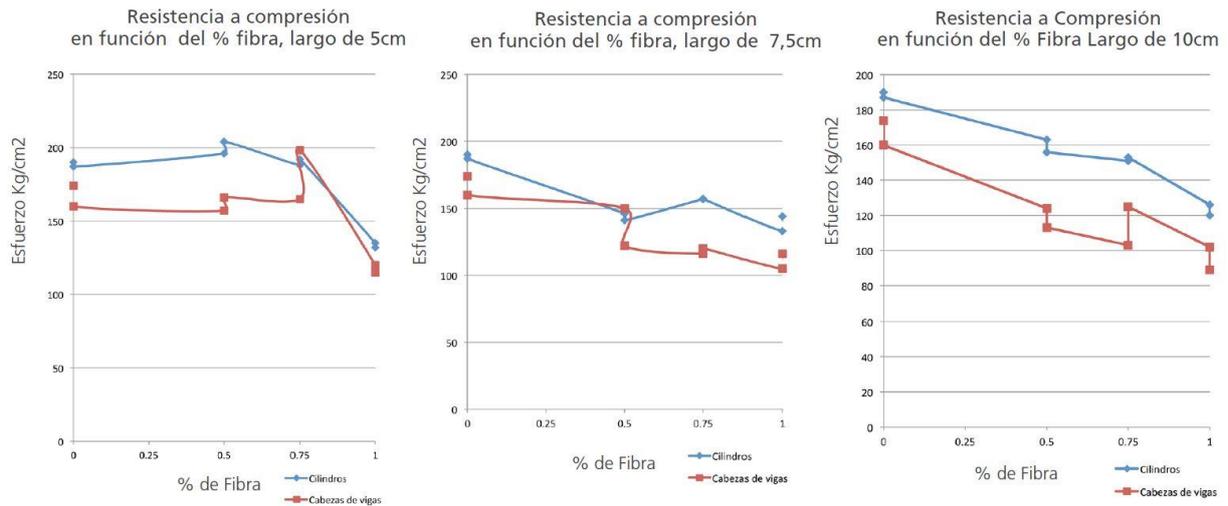
Para comprobar los efectos de la fibra de sisal utilizada para reforzar hormigón, se analiza un artículo escrito por Milena Sosa con la colaboración de la Universidad Central de Venezuela y el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. [61] El ensayo analiza los resultados de las pruebas realizadas para la resistencia mecánica a compresión y flexión utilizando distintas muestras. Las muestras se crean utilizando cemento Portland, arena natural, agua del grifo y las fibras de sisal.

Muestra	Long. de la fibra (cm.)	% Fibra de Sisal
P	0	0
M-1	5	0,5
M-2	5	0,75
M-3	5	1
M-4	7,5	0,5
M-5	7,5	0,75
M-6	7,5	1
M-7	10	0,5
M-8	10	0,75
M-9	10	1

Tabla 22 // Composición de las mezclas realizadas para el ensayo de hormigón reforzado con fibra de sisal. Tabla de [61].

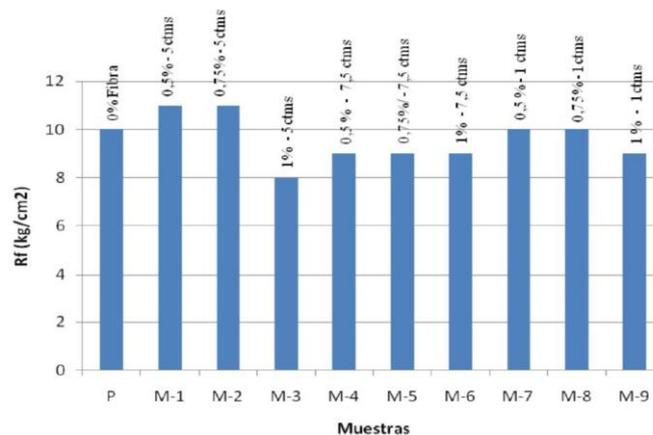
Se preparan distintas probetas (Tabla 22) con fibras de distintas longitudes comprendidas entre los cinco y diez centímetros y porcentajes de adición entre 0,5 y 1%, también se crea una muestra patrón para poder comparar los resultados. Los resultados mostrados se realizan a los 28 días. [61]

Los resultados del ensayo a compresión muestran que el comportamiento es bastante diferente dependiendo de la sección analizada, la cantidad de fibra añadida y la longitud de las fibras (Gráfica 15). El mejor resultado es el de la fibra con longitud de cinco centímetros y un porcentaje de fibra del 0,5%. [61]



Gráfica 15 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de sisal. Gráfica de [61].

Los resultados del ensayo a flexión (Gráfica 16) muestran que la mejor muestra para el refuerzo es la nombrada como M2, cuya longitud de fibra es de cinco centímetros y se ha añadido un 0,75% del volumen total de la muestra. [61]



Gráfica 16 // Resultados del ensayo de resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra de sisal. Gráfica de [61].

7.7.6 | VENTAJAS

- El sisal absorbe más dióxido de carbono del que produce por lo que tiene una huella de emisiones negativa. Los desechos que produce son orgánicos y pueden ser reutilizados.

7.7.7 | INCONVENIENTES

- El transporte desde los países productores puede no ser sostenible.

7.7.8 | CONCLUSIONES

Los ensayos a compresión muestran mejores resultados que la muestra patrón, para una adición de fibra del 0,5% del volumen. La resistencia a flexión no provoca una significativa mejora de los valores obtenidos, pero se consigue una mayor deformación antes de la rotura. La longitud óptima de fibra es de cinco centímetros.

8 | FIBRAS NATURALES MINERALES

Se procede a exponer las propiedades de otras dos fibras cortas, se trata de las dos fibras naturales más empleadas actualmente para el refuerzo de hormigón, son la fibra de vidrio y las fibras de acero, pertenecen al grupo de fibras naturales minerales. El objetivo es obtener unos valores más conocidos con los que comparar las fibras naturales vegetales, estudiadas previamente, para determinar si es posible su sustitución.

8.1 | FIBRA DE VIDRIO

8.1.1 | MATERIA PRIMA

La fibra de vidrio (Imagen 23) es un tipo de fibra natural mineral, actualmente muy utilizado para el refuerzo de materiales. Se puede encontrar en muchos formatos como mallas, rollos o láminas, pero el objeto de este estudio es el de las fibras cortas para el refuerzo en masa, por lo que estas serán las expuestas. Las fibras de vidrio cortas se usan para mejorar la resistencia a tracción del hormigón. [62]



Imagen 23 // Fibras de vidrio. Imagen de Uni-her.

8.1.2 | OBTENCIÓN DE LAS FIBRAS

La fibra de vidrio se conforma de hebras finas hechas a base de sílice. Las fibras se pueden obtener mediante dos procesos. El primero es la fusión directa, consiste en extruir la mezcla de vidrio caliente a través de una maquina con un cabezal que tiene unos orificios muy pequeños. El segundo proceso es la refundición, consiste en fundir el material y cortarlo en pequeñas esferas. Una vez se han obtenido y enfriado las canicas, se vuelven a fundir y se les realiza el mismo proceso de extrusionado. [62]

8.1.3 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,014	2680	1700	2 – 3,5

Tabla 23 // Propiedades físicas de la fibra de vidrio. Tabla de elaboración propia a partir de [63], [64] y [65].

8.1.4 | ENSAYOS

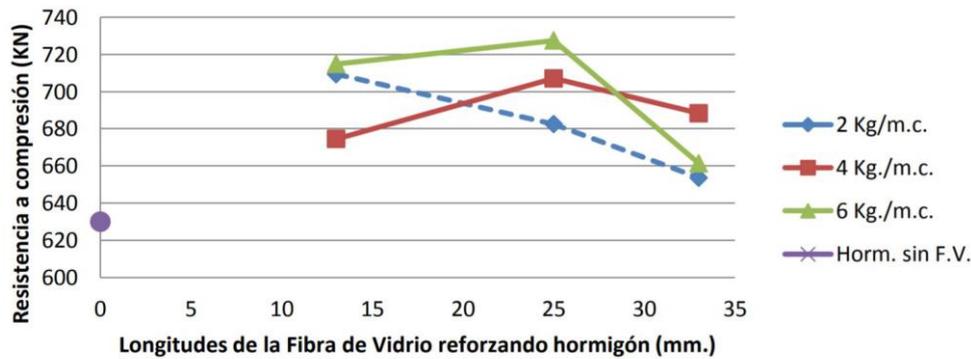
Para determinar las propiedades del hormigón reforzado con fibra de vidrio se analiza un ensayo realizado en la Universidad de Oviedo [62]. El objetivo del ensayo es estudiar las variaciones que presenta el hormigón al reforzarlo con fibra de vidrio. Para el estudio se utilizan una muestra patrón, con cemento CEM III/A 42.5 SR, grava AG-6/20 – T – C, arena AF – 0/4 – T – C y agua del grifo. [62]

Dosificación (Kg/m ³)	Longitudes (mm)
0	0
2	13, 25 y 30/36
4	13, 25 y 30/36
6	13, 25 y 30/36

Tabla 24 // Dosificación y longitudes de la fibra de vidrio añadida en las muestras para la realización de los ensayos. Tabla de [62].

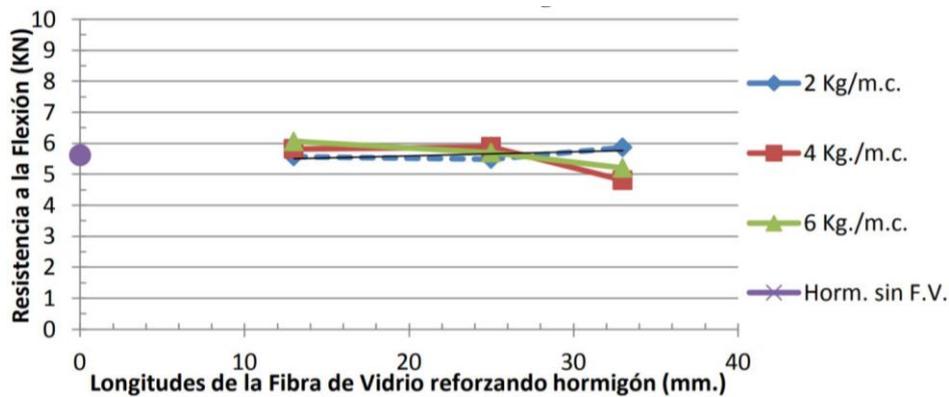
Para el resto de muestras se utiliza el mismo hormigón y, además se añade fibra de vidrio con distinta dosificación y longitudes (Tabla 24). El equivalente de la dosificación de fibra en porcentaje es entre 0% y 2%. [62]

Los resultados de los ensayos a compresión a los 28 días se muestran en la (Gráfica 17). Los resultados de la resistencia al añadir fibra de vidrio son muy positivos, siendo el mejor valor el de una adición de 6 Kg/m³ y una longitud de fibra de 25 mm. [62]



Gráfica 17 // Resultados del ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibra de vidrio. Gráfica de [62].

Los resultados del ensayo a flexión (Gráfica 18) también son positivos, pero los resultados no son tan significativos como los del ensayo a compresión. Los valores de adición 6 y 4 Kg/m³ son los que mejores resultados presentan, pero, en este caso, la mejor longitud de fibra es 13 mm, aunque los valores para 25 mm son bastante aproximados. [62]



Gráfica 18 // Resultados del ensayo a flexión del hormigón reforzado con fibra de vidrio. Gráfica de [62].

8.1.5 | VENTAJAS

- Mejora las propiedades mecánicas del hormigón.
- Excelente trabajabilidad, aunque se añadan grandes cantidades.
- No se corroe.

8.1.6 | INCONVENIENTES

- No son sostenibles.
- Reacciona con los álcalis del cemento, lo que puede dañar las fibras.
- El precio es mucho mayor que el de las fibras naturales vegetales.

8.2 | FIBRA DE ACERO

8.2.1 | MATERIA PRIMA

Las fibras de acero son un tipo de fibra natural mineral (Imagen 24). Actualmente el uso de estas fibras está bastante extendido, ya que sus propiedades aportan una notable mejora en el rendimiento y durabilidad en las construcciones en las que se utiliza. Este tipo de fibras responde a necesidades específicas en el refuerzo de hormigón, en este caso aportan flexibilidad y una mejora en el control de fisuras. Las fibras de acero tienen multitud de acabados, pudiendo ser lisas, rugosas o mixtas, dependiendo del tipo de adherencia deseado se utilizarán unas u otras. [66]



Imagen 24 // Fibras de acero. Imagen de Fierros.

8.2.2 | OBTENCIÓN DE LAS FIBRAS

Las fibras de acero se pueden obtener mediante tres procesos. El primero es el trefilado en frío, consiste en alargar alambres mientras están fríos, provocando un aumento de la longitud de las varillas y una disminución del diámetro. El segundo se trata de el corte de láminas, mediante procesos mecánicos, se realizan cortes con el tamaño necesario. Existen diversos métodos de corte como, por ejemplo, corte por chorro de agua, corte con láser, corte con oxígeno y corte por plasma. Por último, también se pueden obtener mediante el raspado en caliente de bloques de acero. [67], [68]

8.2.3 | PROPIEDADES FÍSICAS

DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RESISTENCIA TRACCIÓN (Mpa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
0,15 – 1	7800	345 – 3000	0,5 – 3,5

Tabla 25 // Propiedades físicas de las fibras cortas de acero. Tabla de elaboración propia a partir de [69], [70] y [71].

8.2.4 | ENSAYOS

Para determinar las resistencias mecánicas del hormigón reforzado con fibra de acero se analiza un artículo publicado en la revista de ingeniería de construcción, realizado en la Universidad Militar Nueva Granada, en Bogotá, Colombia, en el año 2017. El objetivo principal de la investigación era evaluar la corrosión del hormigón reforzado con fibra de acero, pero también se analizan las resistencias a compresión y flexión. [72]

Para la realización del ensayo se utilizaron 54 especímenes, de los cuales 27 son cilindros, para los ensayos de resistencia a compresión y 27 son vigas, para los ensayos a flexión. Como el objetivo era determinar la corrosión se analizan en tres ambientes diferentes, el de condiciones normales es el ambiente A0, por lo que es del que se extraerán los datos para el estudio comparativo. La longitud de las fibras es de 35 milímetros y permanece constante en todas las muestras. [72]

Los porcentajes añadidos son 0, para la muestra patrón, 30 Kg/m³ y 60 Kg/m³, que equivalen a un 0,35% y 0,74%, respectivamente, de fibra añadida al volumen total de la mezcla.

(Tabla 26) [72]

Tipo de ensayo	Tipo de espécimen	Ambiente A0			Ambiente A1			Ambiente A2			Subtotal	Total especímenes
		D_f , kg/m ³			D_f , kg/m ³			D_f , kg/m ³				
		0	30	60	0	30	60	0	30	60		
Resistencia a compresión, f_c	Cilindro	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	54
Desempeño a flexión, f_r	Viga	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	

Tabla 26 // Descripción de las muestras realizadas para el estudio. Tabla de [72].

El hormigón utilizado está formado por cemento Portland convencional Tipo I, agua del grifo, agregado fino tipo arena de río y como agregado grueso se utiliza grava fina con un tamaño máximo de 10 mm, un 10% del cemento fue sustituido por ceniza volante, por último, también se añade un aditivo superplastificante para mejorar la manejabilidad. Como resultado, se obtiene que la resistencia nominal a compresión del hormigón a los 28 días es de 25 Mpa. [72]

Los resultados del ensayo a compresión (Tabla 27) muestran que los valores del hormigón reforzado con fibra de acero son mejores que los resultados de la muestra no reforzada. [72]

Parámetro	A0			A1			A2			
D_f , kg/m ³	0	27.5	58.1	0	27.5	58.1	0	27.5	58.1	
V_f , %	0	0.35	0.74	0	0.35	0.74	0	0.35	0.74	
M , kg/m ³	X	2277	2285	2298	2277	2285	2298	2277	2285	2298
	CV, %	0.2	0.2	0.11	0.2	0.2	0.11	0.2	0.2	0.11
f_c , MPa	X	38.1	36.7	38.7	42.0	43.1	41.0	40.3	42.1	40.9
	CV, %	2.0	1.7	1.7	4.8	1.4	1.6	5.0	0.7	1.4

Tabla 27 // Resultados del ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibra de acero. Tabla de [72].

Los resultados del ensayo a flexión (Tabla 28) no se pueden comparar con la muestra patrón ya que no se proporcionan los valores. [72]

Parámetro	A0			A1			A2			
D_f , kg/m ³	0	27.5	58.1	0	27.5	58.1	0	27.5	58.1	
V_f , %	0	0.35	0.74	0	0.35	0.74	0	0.35	0.74	
M , kg/m ³	X	2277	2285	2298	2277	2285	2298	2277	2285	2298
	CV, %	0.2	0.2	0.11	0.2	0.2	0.11	0.2	0.2	0.11
f_{max} , MPa	X	-	4.50	4.96	-	4.49	4.78	-	4.30	4.49
	CV, %	-	1.3	1.4	-	8.6	13.6	-	6.8	7.9

Tabla 28 // Resultados del ensayo a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero. Tabla de [72].

8.2.5 | VENTAJAS

- Control de fisuras y resistencia al desgaste.
- Comportamiento mecánico igual en todas las direcciones.

8.2.6 | INCONVENIENTES

- Pueden aparecer fibras en la superficie.
- Si no se mezcla adecuadamente puede generar problemas.
- Puede aparecer corrosión.

9 | ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS FIBRAS NATURALES

Para el estudio comparativo de las fibras previamente estudiadas se atiende a distintos criterios que ayudan a comprender las cualidades individuales de cada fibra y muestran qué características son las que las hacen diferentes con la finalidad de determinar cuál es la mejor opción para reforzar hormigón y por qué. Los datos mostrados se han extraído de los ensayos analizados previamente.

Estas tablas y gráficas se encargan tanto de recopilar la información mostrada previamente, como de aportar otros datos todavía no mencionados, de manera individual a modo de resumen visual.

Las comparaciones se basan principalmente en **cinco** áreas características que son: la **composición química**, las **propiedades físicas** de las fibras naturales, la **resistencia mecánica** del hormigón reforzado con las fibras naturales, la **sostenibilidad**, basada en los procesos de obtención de las fibras y las características de su cultivo y por último el **precio**.

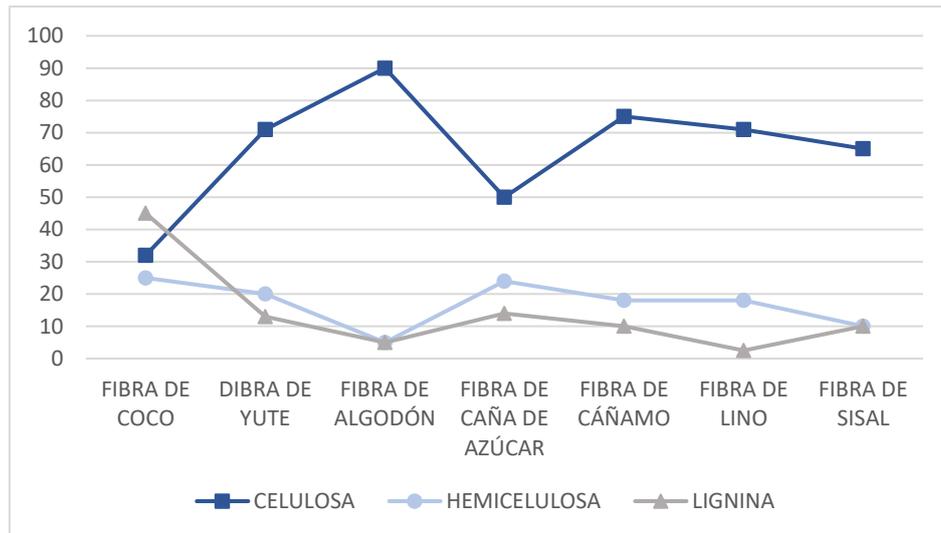
Los ensayos expuestos **no** se han realizado de manera homogénea, ya que han sido realizados por distintas personas, en distintos lugares y con distintos fines. Esto produce una dificultad a la hora de realizar el estudio comparativo. Sin embargo, se han utilizado criterios como la comparación de los porcentajes de mejora para conseguir una comparativa más certera.

El estudio recoge el análisis de siete fibras naturales vegetales, que son las que se quieren poner en valor, ya que son menos utilizadas actualmente, además, se complementa con otras dos fibras naturales minerales, que, hoy en día son más utilizadas a pesar de ser opciones menos sostenibles. Por eso, el estudio comparativo se encarga de comparar las propiedades entre ambos tipos de fibras para ver si es factible su sustitución.

9.1 | COMPOSICION QUIMICA DE LAS FIBRAS VEGETALES

	COCO	YUTE	ALGODÓN	CAÑA DE AZÚCAR	CÁÑAMO	LINO	SISAL
CELULOSA (%)	32 - 43	61 - 71	90	50	65 - 75	62 - 71	65
HEMICELULOSA (%)	15 - 25	14 - 20	5	24	16 - 18	16 - 18	7 - 10
LIGNINA (%)	40 - 45	12 - 13	5	14	8 - 10	2 - 2,5	10

Tabla 29 // Composición química de las fibras naturales. Tabla de elaboración propia a partir de [11], [20], [30], [44] y [47].



Gráfica 19 // Porcentajes composición química de las fibras naturales. Gráfica de elaboración propia a partir de [11], [20], [30], [44] y [47].

Las plantas están formadas por tres polímeros que son la celulosa, hemicelulosa y lignina, dependiendo del porcentaje presente en la planta, las propiedades que tiene serán diferentes. Cada polímero tiene una función, en primer lugar, la lignina, es el componente encargado de unir el resto de los componentes, además, proporciona rigidez a la pared celular. Esto se traduce en una resistencia mayor al ataque de los microorganismos, ya que al formar paredes más rígidas son más resistentes. La lignina también es de gran importancia en el transporte del agua en la planta.[73] Por lo tanto, las fibras con mejores cualidades frente al ataque de microorganismos son las de coco, con un porcentaje de lignina muy superior al resto. Las fibras de caña de azúcar, yute, cáñamo y sisal le siguen con valores bastante similares entre ellas, las fibras de algodón y lino son las que menos lignina contienen (Tabla 29). Cuanto mayor es el porcentaje de lignina presente en un vegetal menor es su absorción.

La celulosa y hemicelulosa son químicamente similares, ambas se encargan de proporcionar resistencia física y estructural a las plantas. La celulosa es un componente hidrofílico de las plantas, por lo que una mayor cantidad de celulosa conlleva una mayor absorción de agua por parte las fibras. Las fibras de algodón son las que más porcentaje de celulosa tienen, las fibras de cáñamo, yute, lino y sisal presentan valores similares, aunque bastante inferiores a los de la fibra de algodón, las últimas en la clasificación con un porcentaje de celulosa menor son las fibras de caña de azúcar y coco (Gráfica 19).

9.2 | PROPIEDADES FÍSICAS

	FIBRAS NATURALES VEGETALES							FIBRAS NATURALES MINERALES	
	COCO	YUTE	ALGODÓN	CAÑA DE AZÚCAR	CÁÑAMO	LINO	SISAL	VIDRIO	ACERO
DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	0,11 - 0,53	0,1 - 0,2	0,12 - 0,22	0,15 - 0,25	0,1 - 0,3	0,12 - 0,16	0,2 - 0,4	0,014	0,15 - 1
DENSIDAD (Kg/m³)	680 - 1020	1030	1540	310 - 410	1480	1500	1450	2680	7800
ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)	14 - 41	1,7 - 1,8	3,0 - 7,0	-	1,6	2,7 - 3,2	2,0 - 2,5	2,0 - 3,5	0,5 - 3,5
RESISTENCIA A TRACCIÓN DE LAS FIBRAS (Mpa)	108 - 250	250 - 350	287 - 800	220 - 290	285	450 - 1100	444 - 552	1700	345 - 3000

 Fibra natural vegetal con mejor resistencia a tracción.  Fibra natural vegetal con peor resistencia a tracción.

Tabla 30 // Propiedades físicas de las fibras naturales. Tabla de elaboración propia a partir de [17], [30], [31], [39], [40], [45], [49], [50], [54], [59], [63], [64], [65], [69], [70] y [71].

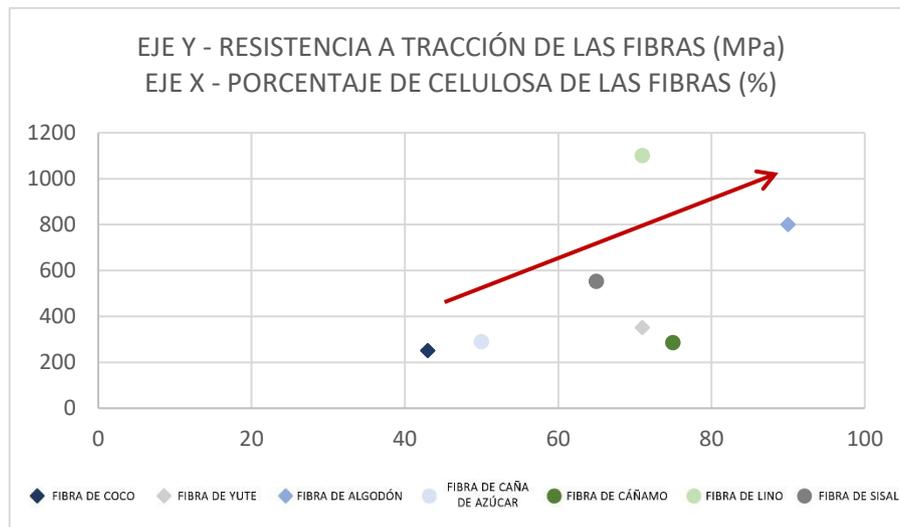
El diámetro equivalente de todas las fibras naturales vegetales oscila entre 0,1 y 0,5 milímetros, destaca que el de las fibras naturales minerales es diferente, muy inferior en el caso de la fibra de vidrio y bastante superior para la fibra de acero. El diámetro equivalente de las fibras puede ser un parámetro determinante en relación a la adherencia de las fibras con el hormigón.

La densidad de las fibras también influye en su comportamiento al ser añadidas a las mezclas de hormigón. Las fibras naturales vegetales tienen unos valores de densidad muy inferiores a los de las fibras naturales minerales. Las fibras que mayor absorción de agua presentan también son las mismas que tienen una mayor densidad.

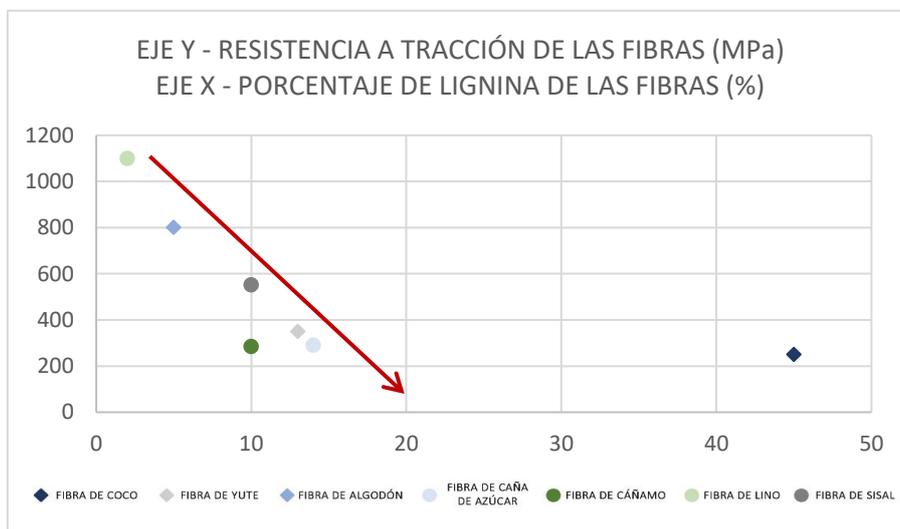
El alargamiento de rotura de las fibras naturales ayuda a que una vez se ha producido la falla el hormigón no se desprenda, por lo tanto, la fibra de coco es la que más mantiene la unión de los elementos del hormigón. El resto de fibras tienen valores muy similares pero muy inferiores a los de la fibra de coco.

La fibra natural vegetal con mejor resistencia a tracción es la fibra de lino, con una resistencia que puede llegar a ser similar a la de la fibra de vidrio. La peor resistencia a tracción es la de la fibra de coco (Tabla 30). Las resistencias a tracción de las fibras naturales minerales son superiores a las de las fibras naturales vegetales, pero los buenos resultados obtenidos en la resistencia del hormigón reforzado con las fibras se pueden deber a la mejor adherencia que presentan las fibras vegetales frente a las minerales al mezclarse con el hormigón.

9.3 | RELACIÓN ENTRE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS VEGETALES



Gráfica 20 // Relación entre la resistencia a tracción de las fibras naturales y el porcentaje de celulosa que contienen. Gráfica de elaboración propia a partir de [11], [17], [20], [30], [31], [39], [40], [44], [45], [47], [49], [50], [54], [59], [63], [64], [65], [69], [70] y [71].



Gráfica 21 // Relación entre la resistencia a tracción de las fibras naturales y el porcentaje de lignina que contienen. Gráfica de elaboración propia a partir de [11], [17], [20], [30], [31], [39], [40], [44], [45], [47], [49], [50], [54], [59], [63], [64], [65], [69], [70] y [71].

La fibra de lino y la fibra de algodón son las dos fibras que mayor porcentaje de celulosa contienen y, a la vez, son las dos que mayor resistencia a tracción presentan (*Gráfica 20*). La fibra de coco y la de caña de azúcar son las que menos contenido de celulosa presentan, lo que se traduce en una menor resistencia a tracción. Sin embargo, la gráfica, también muestra que hay dos fibras, la de cáñamo y la de yute, que a pesar de tener un alto contenido de celulosa tienen valores bastante bajos de resistencia a tracción (*Gráfica 21*).

La fibra de coco es la que mayor presencia de lignina tiene en su composición química y la que peor resultado obtiene en resistencia a tracción. Las fibras de lino y algodón son las que, teniendo un menor porcentaje de lignina, mayor resistencia a la tracción presentan.

Un mayor porcentaje de lignina en las fibras conlleva una mayor durabilidad, pero al tratarse de fibras que son añadidas a la mezcla del hormigón, su durabilidad está asegurada por lo que no es un parámetro determinante.

Por lo tanto, aunque hay alguna excepción se puede concluir que un mayor porcentaje de celulosa es equivalente a una mayor resistencia a tracción de las fibras naturales y, como consecuencia, una mayor presencia de lignina, produce el efecto contrario, es decir, valores inferiores para la resistencia a tracción de las fibras.

9.4 | RESISTENCIAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS NATURALES

La comparativa de las resistencias mecánicas (*Tabla 31*) expone los resultados que se han obtenido al analizar los distintos ensayos realizados con cada tipo de fibra. Según los datos expuestos se puede determinar qué fibras son las que tienen mejores prestaciones, en qué porcentaje se deben añadir y la longitud que han de tener. La falta de una investigación que estudie el comportamiento de todas las fibras en las mismas condiciones dificulta la obtención de unos resultados más certeros y aclaratorios.

Son diferentes: las cantidades y longitudes de cada fibra añadida; el hormigón patrón con el que se compara y el hormigón con el que se mezclan las fibras, pero todas tienen en común que los resultados son a los 28 días. Cada ensayo realiza varias pruebas con distintas longitudes y proporciones, para el estudio comparativo se han elegido los resultados más favorables de cada caso.

No se puede determinar cuál es la fibra óptima para todos los casos por lo anteriormente expuesto, es posible que si se compararan todas las fibras en las mismas condiciones los resultados fueran diferentes, ya que como se ha observado en los ensayos mencionados a lo largo de la investigación, tanto los porcentajes añadidos como la longitud de las fibras hace que los resultados sean más o menos favorables.

Para conseguir que el estudio comparativo sea lo más homogéneo posible, se ha calculado el porcentaje de mejora de las resistencias, tanto a compresión como a flexión, que presentan individualmente los hormigones reforzados con las fibras, extrayendo los datos de los ensayos analizados previamente. Este porcentaje representa la mejora de resistencia que aporta la adición de fibra al hormigón, comparado con la resistencia del hormigón patrón propio de cada ensayo.

	FIBRAS NATURALES VEGETALES							FIBRAS NATURALES MINERALES	
	COCO	YUTE	ALGODÓN	CAÑA DE AZÚCAR	CÁÑAMO	LINO	SISAL	VIDRIO	ACERO
LONGITUD FIBRA (cm)	5	3	3	5 - 6	4 - 5	3	5	2,5	3,5
PORCENTAJE FIBRA AÑADIDO (%)	1,5	0,2	0,4	2,5	1,0	0,1	0,5	2	0,74
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN PATRÓN (MPa)	6,2	23,8	24,5	41,2	27,5	33	17,6	63	38,1
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA (MPa)	7,5	33,2	26,4	40,6	28,3	42,8	19,6	71,1	38,7
MEJORA DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MUESTRA CON FIBRA RESPECTO A LA MUESTRA PATRÓN (%)	20,9	39,5	8	-1,5	2,9	29,7	11,4	12,9	1,6
RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL HORMIGÓN PATRÓN (MPa)	2,6	4,6	4,8	4,5	-	-	0,9	5,5	-
RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (MPa)	3,5	5,2	5,3	2,5	3,9	-	1,2	6,1	4,9
MEJORA DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE LA MUESTRA CON FIBRA RESPECTO A LA MUESTRA PATRÓN (%)	34,6	13,1	10,4	-44,5	-	-	33,3	10,9	-

 Mejor porcentaje de mejora

 Peor porcentaje de mejora

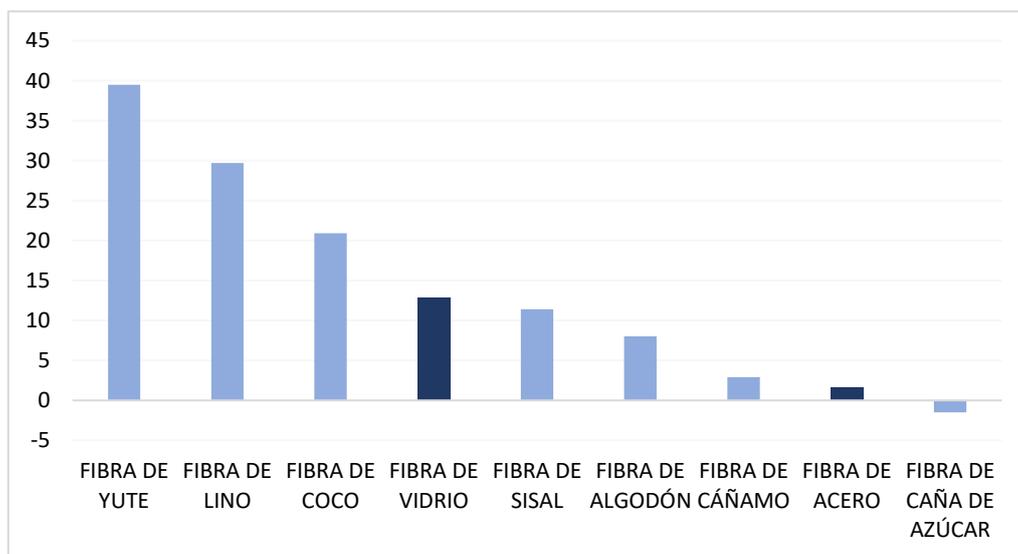
Tabla 31 // Resistencias mecánicas del hormigón reforzado con fibras naturales. Tabla de elaboración propia a partir de [13], [32], [33], [37], [42], [46], [51], [57], [61], [62] y [72].

Al observar los porcentajes de mejora de la resistencia del hormigón (Tabla 31), las fibras que producen un aumento mayor de la resistencia a compresión del hormigón reforzado son las de yute (Gráfica 22).

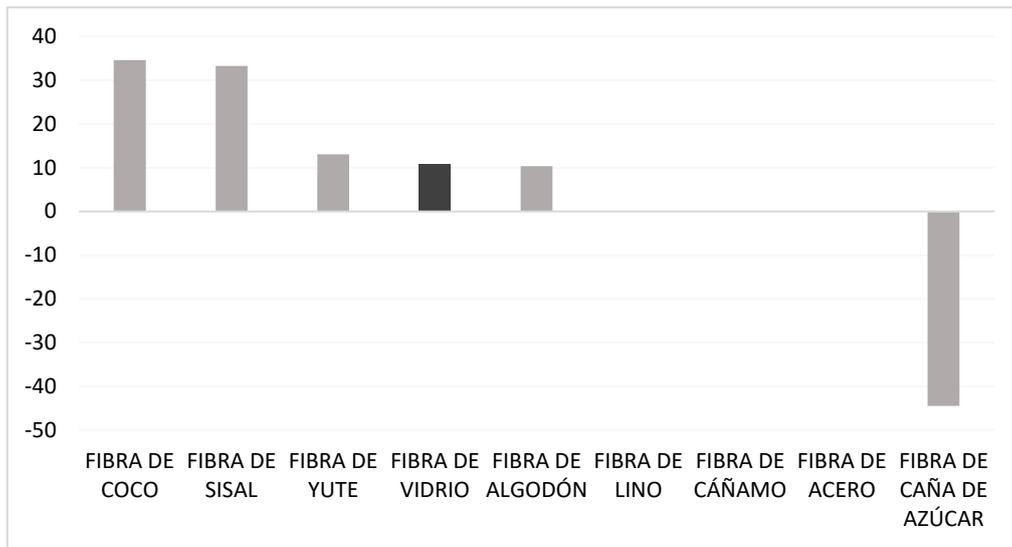
Después de las fibras de yute, las fibras que también tienen porcentajes de mejora de resistencia a compresión superiores al de las fibras de vidrio son las fibras de lino y coco. **Por lo tanto, yute, lino y coco son las fibras que presentan un porcentaje de mejora de la resistencia a compresión del hormigón reforzado superior**, siendo mucho mejor que la que presenta la fibra de vidrio. Los peores resultados son los de la fibra de caña de azúcar, cuya adición al hormigón provoca un descenso de un 1,5% de la resistencia mecánica a compresión.

Al analizar el porcentaje de mejora de la resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibras naturales respecto al hormigón patrón de cada ensayo, lo que se puede observar es que los mejores resultados son los de los hormigones reforzado con fibras de coco y sisal. El hormigón reforzado con fibras de yute tiene una resistencia menor que las dos fibras ya mencionadas, pero también es superior al del hormigón reforzado con fibra de vidrio (Gráfica 23).

Los peores resultados son los de la incorporación de fibra de caña de azúcar ya que no solo no mejora la resistencia a flexión, sino que empeora la resistencia un 44,5%. Comparando los porcentajes de mejora de las fibras naturales vegetales con los de las fibras naturales minerales, se puede observar que los resultados son mucho más satisfactorios (Gráfica 25).



Gráfica 22 // Porcentaje de mejora de la resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibras naturales respecto al hormigón patrón utilizado en cada ensayo (%). Gráfica de elaboración propia a partir de [13], [32], [33], [37], [42], [46], [51], [57], [61], [62] y [72]



Gráfica 23 // Porcentaje de mejora de la resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibras naturales respecto al hormigón patrón utilizado en los ensayos (%). Gráfica de elaboración propia a partir de [13], [32], [33], [37], [42], [46], [51], [57], [61], [62] y [72].

En conclusión, al comparar los porcentajes de mejora, se puede determinar que los hormigones reforzados con fibras naturales que mejor se comportan a **compresión** son los que contienen fibras de **yute**, seguidos de los de lino y coco. En cuanto a los hormigones reforzados con fibras que mejor se comportan a **flexión** se encuentran los reforzados con fibra de **coco**, sisal y yute.

9.5 | SOSTENIBILIDAD

Para determinar la sostenibilidad de las fibras naturales vegetales se analizan factores como la cantidad de agua empleada en su cultivo, su origen, durabilidad, la sostenibilidad de los procesos utilizados para su obtención o extracción. Los resultados se extraen al comparar únicamente fibras naturales vegetales entre ellas, pero también se incorporan las dos fibras naturales minerales estudiadas para observar las ventajas que presentan en comparación.

TIPO DE FIBRA	COCO	YUTE	ALGODÓN	CAÑA DE AZÚCAR	CÁÑAMO	LINO	SISAL	VIDRIO	ACERO
NATURAL	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
BIODEGRADABLE	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO	NO
DURABILIDAD	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
CONSUMO DE AGUA	MEDIO	BAJO	MUY ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	MUY BAJO	ALTO	MUY BAJO
SOSTENIBILIDA EN EL PROCESO DE OBTENCION	MEDIA	ALTA	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA	MUY ALTA	MUY BAJA	MUY BAJA

 Aspectos sostenibles de las fibras naturales

 Aspectos menos sostenibles de las fibras naturales

Tabla 32 // Clasificación según la sostenibilidad de las fibras naturales. Tabla de elaboración propia.

La fibra natural con mejores prestaciones sostenibles es la procedente del **sisal**; le siguen la fibra de yute, cáñamo, lino y caña de azúcar; después la fibra de coco; y por último por el gran consumo de agua durante su producción la fibra de algodón queda en último lugar. Las fibras naturales vegetales tienen una sostenibilidad más elevada que las fibras naturales minerales, ya que sus procesos de obtención son más sostenibles (Tabla 32).

Además de tener propiedades de sostenibilidad óptimas, el sisal es un cultivo producido en países que se encuentran en vías de desarrollo por lo que un aumento de su consumo ayudaría a esos países a crecer económicamente, ya que en algunos casos como en Tanzania tienen el cultivo y la producción necesaria para abastecer, pero la maquinaria que emplean está obsoleta lo que dificulta bastante todo el proceso de obtención. [74]

9.6 | PRECIO

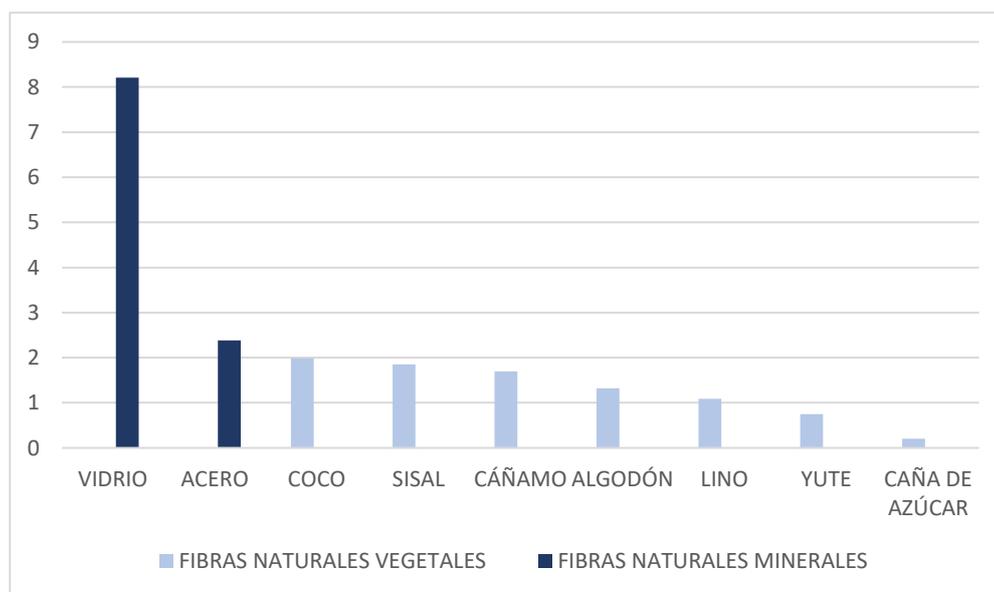
Los datos han sido obtenidos a través de las páginas web de diversos proveedores. Algunos de los valores estaban expresados en dólares o por toneladas, pero para unificar y seguir un criterio comparativo equitativo se han convertido todos a €/Kg de fibra, por lo que dependiendo del valor de la moneda y del proveedor el precio puede variar.

Las fibras naturales vegetales más económicas son las obtenidas de la **caña de azúcar** con un precio que oscila entre los quince y veinte céntimos de euro por kilogramo. Las fibras de yute y lino, aunque no tienen un precio tan bajo, también se mantienen por debajo del euro por kilo. Las más caras son las de coco, con un precio de casi dos euros por kilo. Al comparar las fibras naturales vegetales con las fibras naturales minerales se puede observar que la diferencia económica es considerable, encontrando diferencias de precio que oscilan entre los seis y ocho euros por kilo (Tabla 33), (Gráfica 24).

FIBRAS	FIBRAS NATURALES VEGETALES							FIBRAS NATURALES MINERALES	
	COCO	YUTE	ALGODÓN	CAÑA DE AZÚCAR	CÁÑAMO	LINO	SISAL	VIDRIO	ACERO
PRECIO €/Kg	1,99	0,42 - 0,75	1,32	0,15 - 0,20	1,50 - 1,70	0,59 - 1,09	1,50 - 1,85	8,21	2,38

- Fibra natural vegetal más barata.
- Fibra natural vegetal más cara.

Tabla 33 // Precios de las fibras naturales vegetales y minerales. Tabla de elaboración propia a partir de [31], [47], [65], [66], [75] y [76].



Gráfica 24 // Precio de las fibras naturales vegetales y minerales. Gráfica de elaboración propia a partir de [31], [47], [65], [66], [75] y [76].

10 | SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO

Los materiales de construcción son la base para conseguir una construcción sostenible. Para conseguir que los materiales contribuyan al cuidado del medio ambiente se pueden tomar dos medidas. La primera es conseguir una reducción de las emisiones de carbono y el consumo de energía durante su fabricación y la segunda es aumentar la vida útil de los materiales fabricados para evitar un consumo excesivo de recursos. Una construcción más sostenible es responsabilidad de todos. [77]

El cemento Portland es uno de los materiales de construcción más utilizados mundialmente, y su producción es responsable de la liberación de entre el 5 y el 8% del total de emisiones de dióxido de carbono [78]. Con el objetivo de determinar si se puede conseguir un hormigón que posea las mismas prestaciones o que incluso las mejore, y que, además, sea más respetuoso con el medio ambiente, se estudia la posibilidad de sustituir parcialmente el cemento por otros componentes menos contaminantes.

Los materiales puzolánicos son la principal vía de investigación ya que sus propiedades son óptimas para la sustitución, además se pueden obtener de los desechos de algunas industrias favoreciendo así la reutilización de materiales. Los desechos de los cultivos, además de ser una opción barata, abundante y sostenible han dado buenos resultados en los ensayos realizados.[78] Para poder utilizar estos desechos como sustituto parcial del cemento deben estar tratados de forma que puedan incluirse a la matriz del hormigón, ya que si se adhieren elementos como fibras formarían parte del refuerzo y no sería posible una sustitución.

Se investiga la sustitución del cemento porque es el componente más contaminante del hormigón, debido al elevado consumo energético durante su producción y por la liberación de elevados volúmenes de emisiones de gases, como el dióxido de carbono, causantes del efecto invernadero.[79]

A continuación, se exponen las propiedades y ventajas que presentan dos de los materiales utilizados actualmente como sustitución parcial del cemento, el humo de sílice y las cenizas volantes. Además, también se exponen los resultados de dos ensayos que analizan la posibilidad de sustituir parcialmente el cemento del hormigón por las cenizas de una de las fibras naturales vegetales estudiadas previamente, las cenizas de bagazo de caña de azúcar.

Actualmente no se han encontrado más ensayos ya realizados que sustituyan parcialmente el cemento por las cenizas de otras fibras naturales. Una posible línea de investigación futura sería la sustitución parcial del cemento por las cenizas de las otras fibras naturales estudiadas previamente, el análisis de sus propiedades y la cantidad total que se podría sustituir sin perder prestaciones o incluso mejorando sus propiedades.

10.1 | HUMO DE SÍLICE

La utilización de humo de sílice (*Imagen 25*) ha sido estudiada en algunas investigaciones como posible sustituto parcial del cemento, esta fibra mineral se emplea actualmente para el refuerzo del hormigón con unos resultados bastante positivos. El humo de sílice proviene de fibras de origen mineral, que, aunque de menor sostenibilidad que las de origen vegetal, también pertenece a la familia de las fibras naturales. El humo de sílice es un subproducto industrial que si no se emplea con algún fin debe ser desechado a los vertederos, por lo que su aprovechamiento como sustituto de cemento tiene un valor ecológico a la vez que práctico. [80]



Imagen 25 // Humo de sílice. Imagen de Silicafumesupplier.

Actualmente, en edificación, la cantidad de adición de humo de sílice para hormigones no estructurales deberá ser **inferior al 10%** del peso del cemento. [81]

Efectos que provoca el humo de sílice en el hormigón fresco [80]:

- Necesidad de incorporar más agua o incluir aditivos o plastificantes.
- No afecta el tiempo de fraguado.
- El hormigón tendrá un color más oscuro.

Efectos que provoca el humo de sílice en el hormigón endurecido [80]:

- Baja permeabilidad, que conlleva una mayor durabilidad.
- El módulo de elasticidad es similar al del hormigón convencional.
- La retracción plástica que se produce es superior a la del hormigón convencional.
- La resistencia a compresión es una de las propiedades que más beneficiada se ve por la incorporación de este componente ya que aumenta considerablemente.
- La resistencia a flexión y tracción también mejora.

Efectos que provoca el humo de sílice en la durabilidad del hormigón [80]:

- Mejora de la resistencia frente al hielo y deshielo.
- Mejora de la resistencia frente al ataque de sustancias químicas, sulfatos y cloruros.
- Reducción de la abrasión.
- Excelente para evitar la relación álcali-árido.

Según un estudio elaborado en el Departamento de Mecánica Aplicada de la Universidad de Dahod en India, en el año 2014 la sustitución de un 9% de cemento por humo de sílice incrementa la resistencia a compresión un 18% y la resistencia a flexión un 19,5% con respecto a un hormigón normal a los 28 días. Además, como ya se ha mencionado anteriormente, este ensayo también demuestra que la adición de fibras de algodón es compatible y ayuda a incrementar las prestaciones de este hormigón. [42]

VENTAJAS

- Reducción del impacto medioambiental, por la reutilización de los residuos, que conlleva una disminución de las materias primas utilizadas. [80]

10.2 | CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes (*Imagen 26*) son los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. [81]

Su color depende de la proporción de hierro y carbón sin quemar, pero su aspecto es fino y suave. Su finura media oscila entre 0,2 y 20 micras de diámetro. Actualmente, en edificación, el porcentaje máximo de cenizas volantes que se puede utilizar en la creación de hormigón ha de ser **inferior al 35%** del peso del cemento. Los hormigones con contenido de cenizas volantes se suelen emplear en suelos selenitosos, aguas sulfatadas, aguas de mar, cloradas, aguas residuales e industriales. [82]



Imagen 26 // Cenizas volantes. Imagen de TMR Blog.

Según un informe del Centro de estudios y experimentación de obras públicas, en la elaboración de hormigones que contienen hasta un 20% de cenizas volantes, la mejora de las resistencias mecánicas en un año, puede oscilar entre el 90% y 95% comparando con el hormigón de referencia utilizado, además, no presentan problemas de durabilidad. Sin embargo, otros estudios, demuestran que el empleo de cenizas puede favorecer la reactividad álcali – sílice. [82]

VENTAJAS

- Tienen una sensibilidad al agua muy débil por la ausencia de minerales arcillosos en su composición.

10.3 | CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

Las cenizas de bagazo de caña de azúcar (Imagen 27) son los residuos que se obtienen después de quemar los desechos de las fibras de cañas de azúcar.



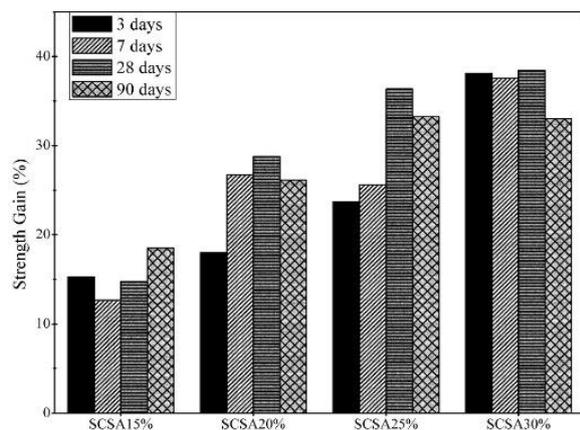
Imagen 27 // Bagazo de caña de azúcar. Imagen de UPV.

En una investigación realizada por el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional en México se obtienen conclusiones interesantes en cuanto a la sustitución del cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar expuestas a continuación. [79]

El estudio realizado se dividía en varias etapas en las cuales se investiga acerca de las propiedades y composición de la ceniza de bagazo para asegurar su compatibilidad con el hormigón. El resultado es favorable ya que se comprueba que la incorporación de esta ceniza no tiene efectos perjudiciales para el hormigón, lo único es que la mezcla creada necesita la incorporación de aditivos que aumenten su trabajabilidad. [79]

En otro ensayo realizado por la Universidad Politécnica de Valencia en colaboración con investigadores brasileños de la Universidad Estadual Paulista, se demuestra la posibilidad de crear un hormigón, más barato y menos contaminante, sustituyendo el cemento portland por las cenizas que provienen de la combustión de residuos de la caña de azúcar. [78]

Para el ensayo se utilizaron diferentes muestras que contenían una sustitución de cemento por cenizas de bagazo de caña de azúcar con distinto un porcentaje entre el 15% y 30%. Esta investigación determina que es posible obtener un hormigón con una **sustitución de hasta el 30%** del cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar. Las propiedades de resistencia de este hormigón mejoran y se mantienen en el tiempo (Gráfica 25). Para una sustitución del 30% la mejora de las propiedades a los 28 días es del 40% respecto al mortero patrón utilizado en la realización del ensayo. [78]



Gráfica 25 // Resistencia del hormigón con la sustitución parcial de cemento por cenizas de bagazo de caña de azúcar. Imagen de [78].

11 | CONCLUSIONES

La utilización de materiales provenientes de fuentes renovables y de origen natural para la elaboración de materiales compuestos, como el hormigón reforzado, permite la reducción de desechos y residuos, a la vez que ayuda a preservar los recursos no renovables.

Todavía queda un largo camino hasta poder utilizar los hormigones reforzados con fibras naturales vegetales de la forma en la que se utilizan hoy en día otros hormigones, ya que, a pesar de que hay diversas líneas de investigación en curso, no existe un análisis homogéneo de las propiedades y características de las fibras naturales vegetales. Continuar investigando el campo de los materiales sostenibles es una necesidad, pero una de las principales dificultades a las que se enfrenta este campo son los resultados a largo plazo. Con la tecnología disponible actualmente se puede llegar a realizar estudios de los que se obtengan conclusiones útiles.

Las fibras naturales vegetales son una buena opción para el refuerzo del hormigón ya que tanto su cultivo como los procesos de extracción son más respetuosos con el medio ambiente. Proviene de fuentes renovables y a pesar de que consumen otros recursos, como agua para su cultivo, los procesos de extracción consumen menos energía, siendo una opción más sostenible que las fibras utilizadas tradicionalmente, además, como se puede ver a lo largo del estudio no se renuncia a las propiedades que mejoran los hormigones.

El uso de fibras naturales vegetales también tiene una gran acción social, ya que muchas de las fibras se pueden obtener de países en vías de desarrollo. Un aumento consciente y sostenible del consumo de estas fibras puede ayudar a impulsar la economía de estos países, que, además de utilizar estos materiales en sus construcciones, no tienen que invertir en la compra de otros materiales y pueden exportarlos.

La composición química de las fibras naturales vegetales revela que un mayor porcentaje de celulosa en las fibras implica una mayor absorción de agua. Una mayor presencia de celulosa también conlleva la mejora de la resistencia a tracción de las fibras. Las **fibras de algodón y lino** son las que más porcentaje de celulosa contienen, por lo que son las **fibras que mayor resistencia a tracción** presentan.

La procedencia de cada ensayo analizado es completamente diferente. Los ensayos estudiados no han sido ejecutados de la misma manera, se han utilizado hormigones con distintas resistencias mecánicas, fibras con distinta proporción y longitud, lo que conlleva que los valores de los resultados de las resistencias mecánicas del hormigón reforzado sean muy distintos. A pesar de esto, los resultados individuales extraídos de cada ensayo son muy interesantes. La elección final de una fibra u otra como material de refuerzo depende del comportamiento que se quiera obtener del hormigón.

Para obtener unas conclusiones uniformes y adecuadas acerca de la resistencia mecánica del hormigón reforzado con fibras naturales, se analizan los resultados de los porcentajes de mejora, que se han obtenido al comparar los valores de resistencia del hormigón patrón de cada ensayo con los valores de resistencia del hormigón reforzado con cada fibra. Se puede concluir que **el hormigón reforzado con fibra de yute es el que mejor responde a los esfuerzos de compresión**, con un porcentaje de mejora del 39,5%. La fibra de lino y la fibra de coco tienen un porcentaje de mejora inferior a la fibra de yute, pero superior al de otras fibras utilizadas actualmente como la fibra de vidrio, que incrementa la resistencia a compresión del hormigón un 12,9%. Las fibras de sisal, algodón y cáñamo tienen valores de mejora inferiores a los de la fibra de vidrio, pero superiores a los de la fibra de acero.

El hormigón reforzado con fibra de coco es el que mejor responde a los esfuerzos de flexión, con un porcentaje de mejora del 34,6%. Le sigue de cerca el hormigón reforzado con fibras de sisal, con un porcentaje de mejora del 33,3%. El hormigón reforzado con fibras de yute tiene un porcentaje de mejora del 13,1%, a pesar de que es inferior al de los hormigones reforzados con fibras de coco y de sisal, es superior al del hormigón reforzado con fibras de vidrio, que tiene un porcentaje de mejora de 10,9%.

Por lo tanto, se determina que **la fibra que provoca un aumento más relevante en las resistencias a compresión y flexión del hormigón es la fibra de yute**. La fibra de coco también es una buena opción, pero la fibra de yute es mejor ya que la resistencia a compresión que le proporciona al hormigón, propiedad más interesante en cuanto al refuerzo de hormigón, es superior.

Todas las fibras naturales vegetales son más sostenibles que el resto de fibras. **La más sostenible es la fibra de sisal**, ya que su cultivo absorbe más dióxido de carbono del que produce, por lo que tiene una huella de emisiones negativa. La fibra natural vegetal menos sostenible es la de algodón, ya que tiene un consumo de agua muy elevado durante su cultivo.

Las ventajas económicas que presentan las fibras vegetales naturales frente a las fibras naturales minerales, que son las más utilizadas actualmente, son evidentes, ya que son mucho más económicas. La fibra natural vegetal **más económica es la fibra de caña de azúcar**. Las fibras de caña de azúcar, yute y lino tienen un precio inferior al euro por kilo.

La elección del tipo de fibra natural empleado para el refuerzo de hormigón depende del aspecto que se quiera realzar. Las conclusiones después del análisis realizado son: la mejor fibra para la resistencia a compresión es la de yute; para la resistencia flexión es la fibra de coco; la fibra más sostenible es la de sisal; por último, la fibra más económica es la de caña de azúcar.

Los ensayos muestran que **la sustitución parcial de cemento por las fibras naturales no es una solución adecuada**, las fibras no forman parte de la matriz, sino que son el refuerzo, por lo que para sustituir parcialmente el cemento se necesita incorporar algún material que sí forme parte de la matriz.

La utilización de las cenizas de algunas fibras naturales vegetales sí puede ser una buena opción. Es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, ceniza de la que ya se han realizado ensayos con resultados favorables. Estos ensayos determinan que **se puede sustituir hasta un 30% del cemento por cenizas de bagazo de caña de azúcar** sin que suponga ninguna disminución de las propiedades. El principal problema de estas investigaciones es el desconocimiento del comportamiento de este material a largo plazo. Una posible línea de investigación futura puede ser la sustitución del cemento por las cenizas del resto de fibras naturales vegetales.

Hasta la fecha lo que más se ha utilizado para la sustitución parcial del cemento son adiciones como el humo de sílice y las cenizas volantes, que, aunque son buenas opciones y han dado buenos resultados, son menos sostenibles que otras opciones como la ceniza de bagazo

12 | REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, “Desarrollo Sostenible – United Nations Sustainable Development Sites,” 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (accessed Apr. 05, 2020).
- [2] Naciones Unidas, “Ciudades – Desarrollo Sostenible,” 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> (accessed Apr. 05, 2020).
- [3] Naciones Unidas, “Consumo y producción sostenibles – Desarrollo Sostenible,” 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> (accessed Apr. 05, 2020).
- [4] Growing Buildings, “Construcción y emisiones CO2 a la atmósfera,” 2018. <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/> (accessed Aug. 01, 2020).
- [5] Structuralia, “El impacto medioambiental de la edificación española,” 2019. <https://blog.structuralia.com/impacto-medioambiental-edificacion-espanola> (accessed Aug. 07, 2020).
- [6] M. Luxán García de Diego, “Arquitectura integrada en el medio ambiente,” *Cuad. Investig. urbanística*, no. 41, pp. 73–88, 1996, doi: 10.20868/ciur.2004.41.1036.
- [7] F. J. Arenas Cabello, “LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y EL MEDIO AMBIENTE,” 2009. https://huespedes.cica.es/gimadus/17/03_materiales.html#2 (accessed Aug. 01, 2020).
- [8] V. Flores-Alés, J. J. Martín-del Río, F. J. Blasco-López, and F. J. Alejandro, “Análisis de impactos ambientales producidos durante la fase de ejecución en edificación: Operaciones de limpieza y recuperación de aguas de lavado de hormigones en España,” *Inf. la Constr.*, vol. 67, no. 538, p. e091, Jun. 2015, doi: 10.3989/ic.14.031.
- [9] M. Ruiza, T. Fernández, and E. Tamaro, “Biografía de Heráclito,” 2004. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/heraclito.htm> (accessed Aug. 12, 2020).
- [10] Naval Composites, “Materiales Compuestos,” 2016. <https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos> (accessed Aug. 02, 2020).
- [11] O. Á. Fenollar Gimeno, “Fibras naturales para materiales compuestos ecológicos. Green Composites,” Jun. 2015, Accessed: Aug. 02, 2020. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/51991>.
- [12] O. Cortés Cely and L. F. Molina Prieto, “Materiales compuestos en arquitectura recursos e impacto ambiental,” *Rev. Invest. (Guadalajara)*, vol. 7, no. 2, pp. 153–173, 2014, doi: 10.29097/2011-639x.174.
- [13] S. L. Quintero García and L. O. González Salcedo, “Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto,” 2016. https://www.researchgate.net/publication/28200147_Uso_de_fibra_de_estopa_de_coco_para_mejorar_las_propiedades_mecanicas_del_concreto (accessed Aug. 15, 2020).
- [14] RAE, “hormigón | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.”

- <https://dle.rae.es/hormigón> (accessed Aug. 04, 2020).
- [15] Á. Nistal Cordero and M. Ruiz Abrio, "El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia," *Tecnol. y Desarro.*, no. 10, p. 4, 2012.
- [16] V. Yepes Piqueras, "Los orígenes del hormigón armado," 2017. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2017/01/04/los-origenes-del-hormigon/> (accessed Aug. 11, 2020).
- [17] P. P. Álvarez, "APLICACIONES ESTRUCTURALES DEL HORMIGÓN CON FIBRAS EN EDIFICACIÓN INTRODUCCIÓN AL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS," 2016.
- [18] RAE, "fibra | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE." <https://dle.rae.es/fibra?m=form> (accessed Aug. 04, 2020).
- [19] D. Quesada, "Fibras vegetales para crear casas sostenibles," 2019. https://www.arquitecturaydiseno.es/pasion-eco/mi-casa-esta-hecha-con-zanahorias_1819 (accessed Aug. 09, 2020).
- [20] A. Gabriela Llerena Encalada, "Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales," 2014. Accessed: Aug. 12, 2020. [Online]. Available: <http://mastersuniversitaris.upc.edu/tecnologiaarquitectura/>.
- [21] Interioresymas, "Las Fibras Vegetales en la Construcción," 2011. <https://interioresymas.wordpress.com/2011/12/16/las-fibras-vegetales-en-la-construccion/> (accessed Aug. 05, 2020).
- [22] A. Zelazko, "Natural fibre," *Britannica*, 2020. <https://www.britannica.com/topic/natural-fiber> (accessed Aug. 06, 2020).
- [23] R. Costa and R. Orriols, "Fibras minerales artificiales y aparato respiratorio," 2012. <https://www.archbronconeumol.org/es-pdf-S0300289612001202> (accessed Aug. 03, 2020).
- [24] G. C. Celestecielo, "El Rincon De Celestecielo: Historia de las Fibras Textiles y los Orígenes de la Moda.," 2012. https://elrincondcelestecielo.blogspot.com/2015/04/historia-de-las-fibras-textiles-y-los.html#.VcjiOfI_Oko (accessed Aug. 03, 2020).
- [25] C. Gosálbez, "¿Qué es la fibra de coco?," 2012. https://www.planetahuerto.es/revista/que-es-la-fibra-de-coco_00151 (accessed Aug. 15, 2020).
- [26] M. Sánchez, "Conoce todo sobre el Cocos nucifera," 2018. <https://www.jardineriaon.com/cocos-nucifera.html> (accessed Aug. 15, 2020).
- [27] Agromatica, "Fibra de coco, un sustrato con gran potencial," 2015. <https://agriculturers.com/fibra-de-coco-un-sustrato-con-gran-potencial/> (accessed Aug. 15, 2020).
- [28] Florka, "Proceso de producción de la Fibra de Coco," 2017. <https://florka.es/proceso-produccion-la-fibra-coco/> (accessed Aug. 15, 2020).
- [29] E. Mattresses and I. N. Sacachún, "Para Fabricar Colchones Ecológicos Hipoalergénicos

- En La Comuna ' Sacachún ,'" vol. 11, no. 1390, pp. 14–19, 2017.
- [30] A. M. Dzul Ek, "Efecto de un agente de acoplamiento natural sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto," 2015. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/410/1/PCM_M_Tesis_2015_Ariana_Dzul.pdf (accessed Aug. 05, 2020).
- [31] "Sustrato de fibra de coco en Planeta Huerto." https://www.planetahuerto.es/venta-sustrato-de-fibra-de-coco_00035 (accessed Sep. 10, 2020).
- [32] A. Abdullah, "Composite Cement Reinforced Coconut Fiber: Physical and Mechanical Properties and Fracture Behavior," *Aust. J. ...*, 2011, Accessed: Aug. 14, 2020. [Online]. Available: https://www.academia.edu/975892/Composite_Cement_Reinforced_Coconut_Fiber_Physical_and_Mechanical_Properties_and_Fracture_Behavior.
- [33] AEFA, "Fibra de coco." <https://aefa-agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/fibra-de-coco> (accessed Aug. 15, 2020).
- [34] Deyute, "El Jutin, un nuevo material para la construcción hecho de fibra de yute," 2012. <https://www.deyute.com/es/noticias-de-yute/34/> (accessed Aug. 17, 2020).
- [35] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Future Fibres: Yute." <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/es/> (accessed Aug. 31, 2020).
- [36] Textextile, "Cosas que necesita saber sobre la fibra de yute," 2017. <https://www.testextile.com/es/las-cosas-necesitan-saber-fibra-de-yute/> (accessed Nov. 02, 2020).
- [37] A. Geovanny Ramón Rodríguez, "UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA: INGENIERIA CIVIL Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERO CIVIL TEMA: INFLUENCIA DE LA FIBRA DE YUTE EN EL DISEÑO DE HORMIGONES PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE 21 A 35 M," 2017.
- [38] Bayer Mexico, "Todo sobre el algodón," 2018. <https://www.hablemosdelcampo.com/todo-sobre-el-algodon/> (accessed Aug. 16, 2020).
- [39] J. Máxima Uriarte, "Algodón: origen, usos, clasificación y características," *caracteristicas.co*, 2020. <https://www.caracteristicas.co/algodon/> (accessed Aug. 16, 2020).
- [40] Numtric, "El algodón: como se produce y sus usos." <https://numtric.com/el-algodon-como-se-produce-y-sus-usos/> (accessed Aug. 16, 2020).
- [41] J. L. Suárez Castañeda, J. W. Restrepo Montoya, A. Quinchía Figueroa, and F. A. Mercado Navarro, "Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica," *Rev. Tecnura*, vol. 21, no. 51, p. 57, Jan. 2017, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a04.
- [42] S. A. Jaiswal and P. A. R. Darji, "Effect on Strength of Concrete Incorporating Cotton Fiber and Silica Fume Conflow-SP Compressive strength Flexural strength," vol. 2, no. 06, pp.

107–109, 2014.

- [43] Infoagro systems, “El cultivo de la caña de azúcar,” 2017. https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_cana_azucar.asp (accessed Aug. 16, 2020).
- [44] Z. Pernalete, F. Piña, M. Suárez, A. Ferrer, and C. Aiello, “Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco,” 2017. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000100001 (accessed Aug. 14, 2020).
- [45] U. A. Material Compuesto Partir De Bagazo De Caña De Azucar Y Almidon De Yuca, A. DE Través Los Ensayos De Tensión Y De, and J. DE Alfonso Ayala Correa Cristian Alejandro Barbosa Fontecha Universidad Santo Tomás Facultad Ingeniería Mecánica Trabajo De Grado Bogotá Dc, “DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y TENACIDAD DE,” 2014.
- [46] B. M. Paricaguán Morales and J. L. Muñoz Cuevas, “Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar,” *Ing. UC*, vol. 26, 2019, Accessed: Aug. 16, 2020. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70760276009/html/index.html>.
- [47] Mundotextil, “Fibras naturales: Cábamo,” 2017. <https://mundotextilmag.com.ar/fibras-naturales-canamo/> (accessed Aug. 16, 2020).
- [48] Canna connection, “¿Qué es el cáñamo industrial y para qué se puede utilizar?,” 2020. <https://www.cannaconnection.es/blog/11770-para-que-se-usa-el-canamo-industrial> (accessed Aug. 16, 2020).
- [49] M. D. Salvador, V. Amigó, A. Nuez, O. Sahuquillo, R. Llorens, and F. Martí, “CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS VEGETALES UTILIZADAS COMO REFUERZO EN MATRICES TERMOPLÁSTICOS.”
- [50] A. : Andrés, L. Gorriá, D. Carlos, and S. Romero, “Estudio comparativo de diferentes tipos de fibras naturales para la fabricación de materiales compuestos biodegradables Trabajo Fin de Grado,” 2017.
- [51] C. Corredor Iván Leonardo and T. Rojas Luis Eduardo, “Uso de la fibra de cáñamo para mejorar las propiedades mecánicas del Concreto.”
- [52] Ecured, “Lino.” [https://www.ecured.cu/Lino_\(Planta\)](https://www.ecured.cu/Lino_(Planta)) (accessed Aug. 17, 2020).
- [53] Infoagro systems, “El cultivo del Lino.” https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_del_lino.asp (accessed Aug. 17, 2020).
- [54] D. Dña Eva María Rubio Alvir, D. Fernando Sánchez López, and D. Santiago Ferrándiz Bou, “TESIS DOCTORAL FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GREEN COMPOSITES CON BIORESINA Y TEJIDO DE FIBRA NATURAL DE LINO MEDIANTE MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA,” 2016.

- [55] Ecolinen, "El Lino y su preparación," 2016. <https://linoaustral.cl/index.php/el-lino/el-lino-y-su-preparacion> (accessed Aug. 17, 2020).
- [56] Supreme creations, "ENFOQUE DE LA FIBRA: LINO," 2019. <https://www.supreme-creations.es/blog/post/enfoque-de-la-fibra-lino-lino/> (accessed Aug. 17, 2020).
- [57] A. Milad, "Impact and Performance of Linen Fiber Reinforced Concrete in Slender Columns," *Am. J. Sci. an Eng. Res.*, vol. 3, no. 2, 2020, Accessed: Aug. 21, 2020. [Online]. Available: www.iarjournals.com.
- [58] M. del M. Nogueira López, "Análisis del hormigón reforzado con fibra de lino." Accessed: Aug. 12, 2020. [Online]. Available: [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-ASIG-200637/TAB42359/Hormigon con fibra de lino \(Marar Nogueira\).pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-ASIG-200637/TAB42359/Hormigon%20con%20fibra%20de%20lino%20(Marar%20Nogueira).pdf).
- [59] Percam, "Hilo de Sisal," *Percam cordeleria*, 2018. <http://www.percamsa.com/productos/agricultura/sisal/> (accessed Aug. 17, 2020).
- [60] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Future Fibres: Sisal," *Fibras del futuro*. <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibras/sisal/es/> (accessed Aug. 17, 2020).
- [61] M. Sosa, Y. Centeno, and I. Águila, "Desempeño del concreto reforzado con fibras de sisal para la producción de componentes constructivos," *Tecnol. y Construcción*, vol. 28, no. 1, pp. 20–29, 2014.
- [62] S. Villamudria Rivera, "Modificación de las Propiedades del Hormigón al ser Reforzado con Fibra de Vidrio AR," 2014.
- [63] O. C. Reinforcements, "Hilos cortados Cem-FIL[®] para mejorar las propiedades mecánicas de hormigones y morteros Anti-Crak[®] HP." Accessed: Sep. 26, 2020. [Online]. Available: www.ocvreinforcements.com.
- [64] E. DE Técnica Superior Ingenieros De Caminos, C. Y. Puertos, and A. Sofía Irías Pineda, "UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID REFUERZO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES CON HORMIGONES CON FIBRAS O SOLO FIBRAS Trabajo Fin de Máster."
- [65] Cronolab, "Hilos cortados (6 mm.) - Cronolab Spain, S.L." <https://www.tiendaonlineplastiform.es/fibras-de-vidrio-y-de-carbono/24-hilos-cortados.html> (accessed Sep. 26, 2020).
- [66] BECOSAN, "Hormigón con fibras de acero." <https://www.becosan.com/es/hormigon-con-fibras-de-acero/> (accessed Sep. 26, 2020).
- [67] ESAB, "Cuál es la mejor manera de cortar placa de acero." https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/cuale_es_la_mejor_manera_de_cortar_placa_de_acero.cfm (accessed Sep. 26, 2020).
- [68] Gespavi, "HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO." <http://www.gespavi.com/idi/hormigon-reforzado-con-fibras-de-acero/> (accessed Sep. 26, 2020).

- [69] Área de Ingeniería de la Construcción, “Índice Otros hormigones reforzados con fibras Inconveniente tradicional del mortero y el hormigón : Baja resistencia a tracción,” 2012.
- [70] D. Caminos, C. Y. Puertos Máster En Ingeniería De Estructuras, and C. Y. Materiales, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS.”
- [71] “Fibra Ondulada - PAVICRET, pavimentos y revestimientos en Valencia.” <https://pavicret.com/producto/fibra-metalica-ondulada/> (accessed Sep. 26, 2020).
- [72] J. Carrillo, J. Cárdenas Pulido, W. Aperador, and J. Carrillo, “Flexural mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under corrosive environments,” *Rev. Ing. Construcción RIC*, vol. 32, no. 2, 2017, Accessed: Sep. 27, 2020. [Online]. Available: www.ricuc.cl.
- [73] M. Lecea Romera and J. Manzano Gómez, “Estructura y función de la lignina,” *Abengoa*, 2016. <http://www.laenergiadelcambio.com/estructura-funcion-lignina/> (accessed Aug. 19, 2020).
- [74] D. Jensen, “Renovación en África Oriental,” *Campo y mecánica*, Jun. 2016.
- [75] “Promoción Primas Fibras De Cáñamo, Compras online de Primas Fibras De Cáñamo promocionales, [spanish.alibaba.com.](https://spanish.alibaba.com/promotion/promotion_raw-hemp-fiber-promotion-list.html)” https://spanish.alibaba.com/promotion/promotion_raw-hemp-fiber-promotion-list.html (accessed Sep. 15, 2020).
- [76] Index Mundi, “Algodón - Precio Mensual (Euro por Kilogramo) - Precios de Materias Primas,” 2020. <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=algodon&moneda=eur> (accessed Nov. 02, 2020).
- [77] D. P. Bentz, “Concreto Sostenible Para la Construcción Sustentable,” no. October, 2014.
- [78] J. C. B. Moraes *et al.*, “Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 670–677, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108.
- [79] A. I. para la difusión de la ciencia y la Tecnología, “Bagazo de caña, posible componente de concreto hidráulico.” <https://www.dicyt.com/noticias/bagazo-de-cana-posible-componente-de-concreto-hidraulico> (accessed Aug. 16, 2020).
- [80] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, “Humo de sílice.”
- [81] J. M. Vercher Sanchis, “Materiales de construcción,” 2015.
- [82] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas Ministerio de Fomento, “Las cenizas volantes,” 2011. <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/valorizacion/propiedades-del-residuo/23/las-cenizas-volantes.html> (accessed Oct. 07, 2020).

13 | ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 // Objetivos de desarrollo sostenible. Imagen de Naciones Unidas.	2
Imagen 2 // Ciclo de vida de los materiales. Imagen de Klarea.	4
Imagen 3 // Diagrama de clasificación de los materiales compuestos. Imagen de la clasificación realizada por Mott, 2009.....	7
Imagen 4 // Construcciones prehistóricas. Imagen de Interioresymas.....	11
Imagen 5 // Mezquita Djinguereber Mali. Imagen de Arkiplus.....	12
Imagen 6 // Andamios de bambú. Imagen de Macfromlondon.....	12
Imagen 7 // Composite reforzado con partículas, fibras cortas ordenadas, fibras cortas desordenadas y fibras largas. Imagen de comunidadbiomedica.....	13
Imagen 8 // Componentes básicos que forman las fibras naturales. Imagen de Cerzos Conicet.	16
Imagen 9 // Cocos Nucifera. Imagen de Jardineriaon	17
Imagen 10 // Fibra de coco. Imagen de Agriculturers.....	17
Imagen 11 // Corchorus Capsularis. Imagen de Elyute.	21
Imagen 12 // Fibra de yute. Imagen de Material Innovador.....	21
Imagen 13 // Gossypium. Imagen de infocampo.	25
Imagen 14 // Fibra de algodón. Imagen de kramynia	25
Imagen 15 // Saccharum officinarum. Imagen de Agronews Castilla y León.....	28
Imagen 16 // Fibra de caña de azúcar. Imagen de Thamizhpparithi.....	28
Imagen 17 // Cannabis Sativa. Imagen de Casanare.	32
Imagen 18 // Fibra de cáñamo. Imagen de Aimplas.....	32
Imagen 19 // Linum usitatissimum. Imagen de tusplantasmedicinales.....	35
Imagen 20 // Fibra de lino. Imagen de Baltic Flax.	35
Imagen 21 // Agave sisalana. Imagen de Camila Jurado.	38
Imagen 22 // Fibras de sisal. Imagen de Nikita Lysenko.....	38
Imagen 23 // Fibras de vidrio. Imagen de Uni-her.	41
Imagen 24 // Fibras de acero. Imagen de Fierros.....	43
Imagen 25 // Humo de sílice. Imagen de Silicafumesupplier.	57

Imagen 26 // Cenizas volantes. Imagen de TMR Blog.....	58
Imagen 27 // Bagazo de caña de azúcar. Imagen de UPV.....	59

14 | ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 // Clasificación general de las fibras según su origen. Tabla de elaboración propia a partir de [23].	14
Tabla 2 // Clasificación fibras naturales según su origen y procedencia. Tabla de elaboración propia a partir de [24].	14
Tabla 3 // Clasificación de las fibras químicas según su base o proceso de creación. Tabla de elaboración propia a partir de [24].	15
Tabla 4 // Porcentaje composición química de la fibra de coco. Tabla de elaboración propia a partir de [30].	18
Tabla 5 // Propiedades físicas de la fibra de coco. Tabla de elaboración propia a partir de [17], [30] y [31].	18
Tabla 6 // Nomenclatura, longitud y porcentaje de fibra añadido en las muestras para la realización de los ensayos de hormigón reforzado con fibra de coco. Tabla de [13].	18
Tabla 7 // Porcentaje composición química de la fibra de yute. Tabla de elaboración propia a partir de [30].	22
Tabla 8 // Propiedades físicas de la fibra de yute Tabla de elaboración propia a partir de [17]	22
Tabla 9 // Nomenclatura, longitud y porcentaje de fibra añadido en las muestras para la realización de los ensayos de hormigón reforzado con fibra de yute. Tabla de [37]	22
Tabla 10 // Porcentaje composición química de la fibra de algodón Tabla de elaboración propia a partir de [11].	26
Tabla 11 // Propiedades físicas de la fibra de algodón Tabla de elaboración propia a partir de [39] y [40].	26
Tabla 12 // Resultados del ensayo de refuerzo con fibras de algodón y humo de sílice. Tabla de elaboración propia a partir de [40].	27
Tabla 13 // Porcentaje composición química de la fibra de caña de azúcar. Tabla de elaboración propia a partir de [44].	29
Tabla 14 // Propiedades físicas de la fibra de caña de azúcar. Tabla de elaboración propia a partir de [45].	29
Tabla 15 // Valores de resistencia a compresión de la muestra patrón del ensayo de hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar. Tabla de [46].	29
Tabla 16 // Porcentaje composición química de la fibra de cáñamo. Tabla de elaboración propia a partir de [11] y [47].	33
Tabla 17 // Propiedades físicas de la fibra de cáñamo. Tabla de elaboración propia a partir de [49] y [50].	33

Tabla 18 // Porcentaje composición química de la fibra de lino. Tabla de elaboración propia a partir de [11].	36
Tabla 19 // Propiedades físicas de la fibra de lino. Tabla de elaboración propia a partir de [49] y [54].	36
Tabla 20 // Porcentaje composición química de la fibra de sisal. Tabla de elaboración propia a partir de [20].	39
Tabla 21 // Propiedades físicas de la fibra de sisal. Tabla de elaboración propia a partir de [49], [50] y [59].	39
Tabla 22 // Composición de las mezclas realizadas para el ensayo de hormigón reforzado con fibra de sisal. Tabla de [61].	39
Tabla 23 // Propiedades físicas de la fibra de vidrio. Tabla de elaboración propia a partir de [63], [64] y [65].	41
Tabla 24 // Dosificación y longitudes de la fibra de vidrio añadida en las muestras para la realización de los ensayos. Tabla de [62].	41
Tabla 25 // Propiedades físicas de las fibras cortas de acero. Tabla de elaboración propia a partir de [69], [70] y [71].	43
Tabla 26 // Descripción de las muestras realizadas para el estudio. Tabla de [72].	44
Tabla 27 // Resultados del ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibra de acero. Tabla de [72].	44
Tabla 28 // Resultados del ensayo a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero. Tabla de [72].	44
Tabla 29 // Composición química de las fibras naturales. Tabla de elaboración propia a partir de [11], [20], [30], [44] y [47].	45
Tabla 30 // Propiedades físicas de las fibras naturales. Tabla de elaboración propia a partir de [17], [30], [31], [39], [40], [45], [49], [50], [54], [59], [63], [64], [65], [69], [70] y [71].	47
Tabla 31 // Resistencias mecánicas del hormigón reforzado con fibras naturales. Tabla de elaboración propia a partir de [13], [32], [33], [37], [42], [46], [51], [57], [61], [62] y [72].	51
Tabla 32 // Clasificación según la sostenibilidad de las fibras naturales. Tabla de elaboración propia.	54
Tabla 33 // Precios de las fibras naturales vegetales y minerales. Tabla de elaboración propia a partir de [31], [47], [65], [66], [75] y [76].	55

15 | ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de coco. Gráfica de [13]	19
Gráfica 2 // Deformación máxima del hormigón reforzado con fibra de coco a lo largo del tiempo. Gráfica de [13].	19
Gráfica 3 // Resultados del ensayo de resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra de coco. Gráfica de [13]	19
Gráfica 4 // Relación entre la longitud, el volumen añadido y la resistencia del hormigón reforzado con fibra de coco. Gráfica de [13].	20
Gráfica 5 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de yute. Gráfica de [37].....	23
Gráfica 6 // Resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de yute según el porcentaje de fibra añadido a los 28 días. Gráfica de [37].	23
Gráfica 7 // Resultados del ensayo de resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra de yute. Gráfica de [37].....	23
Gráfica 8 // Módulo de rotura a flexión según porcentaje de fibra de yute añadido. Gráfica de [37].	24
Gráfica 9 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar larga. Gráfica de [46].....	30
Gráfica 10 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar corta. Gráfica de [46].	30
Gráfica 11 // Comparativa de los resultados ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar. Gráfica de [46].	30
Gráfica 12 // Resultados ensayo a flexión del hormigón reforzado con fibra de caña de azúcar. Gráfica de [46].....	31
Gráfica 13 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de cáñamo. Gráfica de [51].....	34
Gráfica 14 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de lino. Gráfica de elaboración propia a partir de [57].	37
Gráfica 15 // Resultados del ensayo de resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibra de sisal. Gráfica de [61].....	40
Gráfica 16 // Resultados del ensayo de resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra de sisal. Gráfica de [61].....	40
Gráfica 17 // Resultados del ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibra de vidrio. Gráfica de [62].....	42

Gráfica 18 // Resultados del ensayo a flexión del hormigón reforzado con fibra de vidrio. Gráfica de [62].	42
Gráfica 19 // Porcentajes composición química de las fibras naturales. Gráfica de elaboración propia a partir de [11], [20], [30], [44] y [47].	46
Gráfica 20 // Relación entre la resistencia a tracción de las fibras naturales y el porcentaje de celulosa que contienen. Gráfica de elaboración propia a partir de [11], [17], [20], [30], [31], [39], [40], [44], [45], [47], [49], [50], [54], [59], [63], [64], [65], [69], [70] y [71].	48
Gráfica 21 // Relación entre la resistencia a tracción de las fibras naturales y el porcentaje de lignina que contienen. Gráfica de elaboración propia a partir de [11], [17], [20], [30], [31], [39], [40], [44], [45], [47], [49], [50], [54], [59], [63], [64], [65], [69], [70] y [71].	48
Gráfica 22 // Porcentaje de mejora de la resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibras naturales respecto al hormigón patrón utilizado en cada ensayos (%). Gráfica de elaboración propia a partir de [13], [32], [33], [37], [42], [46], [51], [57], [61], [62] y [72].	52
Gráfica 23 // Porcentaje de mejora de la resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibras naturales respecto al hormigón patrón utilizado en los ensayos (%). Gráfica de elaboración propia a partir de [13], [32], [33], [37], [42], [46], [51], [57], [61], [62] y [72].	53
Gráfica 24 // Precio de las fibras naturales vegetales y minerales. Gráfica de elaboración propia a partir de [31], [47], [65] y [66].	55
Gráfica 25 // Resistencia del hormigón con la sustitución parcial de cemento por cenizas de bagazo de caña de azúcar. Imagen de [78].	59