



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

“Materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibra natural aplicados en estructuras de hormigón armado, estudio de revisión.”

Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Benítez Soxo Walther Israel

Tutor:

Ing. Oscar Cevallos V. PhD

Riobamba, Ecuador.2021

REVISIÓN DEL TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título:
MATERIALES COMPUESTOS CEMENTICIOS REFORZADOS CON FIBRAS
NATURALES APLICADOS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO,
ESTUDIO DE REVISIÓN.

Presentado por: Walther Israel Benítez Soxo

Dirigido por: Ing. Oscar Cevallos V. PhD.

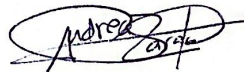
Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH. Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Oscar Cevallos V., PhD.



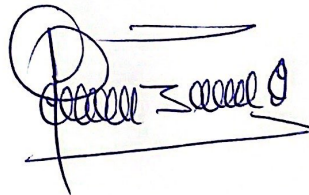
Tutor del proyecto

Ing. Andrea Zárate, Mgs.



Miembro del Tribunal

Ing. Javier Palacio, Mgs.



Miembro del Tribunal

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, Walther Israel Benitez Soxo, con cédula de identidad N° 060507455-8, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, soy responsable de las ideas, doctrinas, resultados y propuesta realizada en la presente investigación, titulada: **“MATERIALES COMPUESTOS CEMENTICIOS REFORZADOS CON TEJIDOS DE FIBRA NATURAL APLICADOS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO, ESTUDIO DE REVISIÓN”**, dirigida por el Tutor del proyecto, Ing. Oscar Cevallos V. PhD.

En virtud de ello, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo, interpretación de datos y la elaboración de conclusiones, con el aporte de varios autores que se han referido adecuadamente en el contenido del documento.



.....

Sr. Benítez Soxo Walther Israel

C.I. 060507455-8

AUTONOMA DE LA INVESTIGACION

DECLARACIÓN EXPRESA DE LA TUTORÍA

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del grado de INGENIERO CIVIL, con el tema: "**MATERIALES COMPUESTOS CEMENTICIOS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES APLICADOS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO, ESTUDIO DE REVISIÓN.**", ha sido elaborado por Walther Israel Benítez Soxo, el mismo que ha sido revisado y analizado en un cien por ciento con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor, por lo que se encuentran apta para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.



Ing. Oscar Cevallos V. PhD.
Tutor del proyecto

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por brindarme vida y todos los medios necesarios para poder culminar esta etapa.

A mi familia, quienes me han ayudado y apoyado en cada paso que doy con consejos, enseñanzas, experiencias las cuales me han servido y ayudado a lo largo de mi vida, además de su apoyo económico para cursar mi etapa estudiantil.

A mi tutor PhD. Oscar Cevallos, que ha sabido guiarme con su experiencia y conocimiento en la elaboración de este proyecto de investigación.

A mi institución de formación académica y mis profesores, que día a día durante mi etapa de estudiante me compartieron sus conocimientos sin egoísmo alguno.

Walther Israel Benítez Soxo

DEDICATORIA

A Dios, quien es el dueño de todo logro, ya que sin el nada sería posible, fue el quien cada día nos dio la capacidad a mí y mi familia de seguir adelante.

A mis padres Walter Benítez y Brenda Soxo, quienes me han respaldado en todo momento y de muchas formas durante mi formación académica, les dedico este logro con todo mi cariño y amor.

A quienes forman mi familia y mi hogar, por su compañía y apoyo durante mis estudios, por el calor de hogar y la felicidad que me han brindado se los dedico con gran cariño.

A mis amigos, que día tras día se transformaron en una familia y siempre encontramos respaldo entre nosotros, siendo parte fundamental de este logro.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 Fibras.....	16
3.1.1 Clasificación de las fibras	17
3.1.1.1 Fibras cortas	17
3.1.1.2 Fibras largas	18
3.1.2 Propiedades de las fibras	18
3.1.2.1 Composición de fibras vegetales.....	20
3.1.2.2 Propiedades de las fibras naturales.	21
3.2 Materiales compuestos.....	22
3.2.1 Matrices.....	24
3.2.1.1 Clasificación de los tipos de matrices.....	24
3.2.1.1.1 Compuestos de matriz metálica	24
3.2.1.1.2 Compuestos de matriz cerámica o cementicios	25
3.2.1.1.3 Compuestos de matriz polimérica	25
3.2.2 Refuerzos.....	26
3.2.2.1 Compuestos reforzados con fibras.....	26
3.2.2.2 Compuestos reforzados con partículas	27
3.2.2.3 Compuestos con refuerzo estructural.....	28
3.3 Sistemas FRCC/TRM.....	29
3.3.1 Materias primas	30
3.3.1.1 Materia prima en matriz.....	30
3.3.1.2 Materia prima en interfase	30
3.3.2 Tejidos textiles de refuerzo	31

4. METODOLOGÍA.....	32
4.1 Obtención de materias primas y el compuesto final.....	33
4.1.1 Extracción de las fibras naturales	34
4.1.1.1 Extracción mecánica.....	34
4.1.1.2 Extracción química	34
4.1.1.3 Extracción biológica	34
4.1.1.4 Extracción combinada	35
4.1.1.5 Efectos de la extracción.....	35
4.1.2 Técnicas para recubrimiento y curado de fibras de refuerzo	36
4.1.3 Proceso de elaboración del mortero como matriz	36
4.1.4 Procesos y técnicas utilizados en la elaboración de FRFCM con tejidos naturales..	37
4.1.5 Técnicas utilizadas para la colocación de los compuestos NFRFCM como refuerzo en elementos de hormigón armado.	38
4.1.5.1 Sistema de encamisado.	38
4.1.5.2 Sistema TRC-SiP.....	39
4.1.6 Método analítico para la predicción del comportamiento en la interfase FRFCM- elemento de hormigón.	41
4.1.6.1 Problema Modo II.	41
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
5.1 Materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibras naturales	43
5.1.1 Materias primas utilizadas en la producción de materiales compuestos FRFCM/TRM reforzados con tejidos de fibras naturales.	43
5.1.2 Propiedades físicas y mecánicas de los compuestos FRFCM reforzados con tejidos de fibras naturales.....	47
5.1.2.1 Resistencia a tracción de compuestos NFRFCM.	47
5.1.2.1.1 Resistencia a tracción respecto al área transversal del compuesto.	48
5.1.2.1.2 Resistencia a tracción respecto al área transversal del tejido.	49
5.1.2.2 Módulo de elasticidad en la primera fase de compuestos NFRFCM.	50
5.1.2.3 Módulo de elasticidad en la tercera fase de compuestos NFRFCM.	51
5.1.2.4 Interacción de los compuestos FRFCM con un sustrato de hormigón armado. ..	53
5.1.2.4.1 Comportamiento y mecanismos de falla en la interfase FRFCM-Elemento de hormigón. 54	
5.1.2.4.2 Comportamiento de los elementos RC reforzados con compuestos FRFCM...	56

5.1.3 Usos y aplicaciones de los materiales compuestos NFRCM en elementos de hormigón armado.	57
5.1.3.1 Refuerzo estructural para cargas dinámicas.	57
5.1.3.2 Refuerzo rígido de estructuras.	58
5.1.3.3 Compuestos SiP-TRC como refuerzo en sustitución de barras de acero discretas en vigas.	58
5.1.3.4 Compuestos FRCM para mejorar la capacidad de carga y deformación de vigas RC.	58
5.1.3.5 Chaquetas de compuesto FRCM para confinamiento de columnas RC.	59
5.1.3.6 Reforzamiento a flexión de losas bidireccionales.	59
5.1.3.7 Reforzamiento a cargas cíclicas y fatiga.	59
5.1.3.8 Refuerzo de vigas RC dañadas por corrosión.	60
5.2 Potencial de los NFRCM para el reforzamiento de elementos de hormigón armado y los retos que se deberán enfrentar en su estudio.	60
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	64
6.1 Conclusiones.	64
6.2 Recomendaciones.	67
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1, estructura porcentual de fibras vegetales.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2, propiedades físicas y mecánicas de las fibras.	21

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1, Clasificación de las fibras.	16
Figura 2, clasificación de las fibras vegetales y naturales.	17
Figura 3, Representación esquemática de la pared.	19
Figura 4, Unión e interfases entre las fases de un material compuesto: (a) unión directa entre la fase primaria y la secundaria (b) adición de un tercer componente para unir las fases y formar una interfase y (c) formación de una interfase por solución de las fases primaria y secundaria en sus límites.	23
Figura 5, Probeta ensayada en dirección del refuerzo-Diagrama esfuerzo deformación (solicitud longitudinal de las fibras).	23
Figura 6, Probeta ensayada en dirección transversal del refuerzo-Diagrama esfuerzo deformación (solicitud transversal de las fibras).	24
Figura 7, Calcificación de los compuestos según su refuerzo.	26
Figura 8, Disposición de refuerzos en fibras. (a: Fibras continuas libres ubicadas en paralelo), (b: Tejido de fibras continuas) y (c: Fibras discontinuas ubicadas unidireccionalmente y fibras discontinuas como material disperso)	27
Figura 9, Refuerzo con partículas dispersas.	28
Figura 10, compuestos con refuerzo estructural. (a) Estructura laminar convencional, (b) Estructura sándwich con relleno de espuma (c) Estructura sándwich de panel.	29
Figura 11, Tipos de montajes de tejidos de refuerzo; a. Tejido; b. De punto; c. Unido.	31
Figura 12, diagrama de metodología de la investigación.	32
Figura 13, Comportamiento mecánico de fibras de banana extraídas, obtenidas en distintos periodos de tiempo de extracción.	35
Figura 14, Diseño y fabricación de mallas de fibra natural vegetal.	37
Figura 15, colocación del encamisado de compuestos FRCM.	39
Figura 16, encamisado en placas y en espiral de compuestos FRCM.	39
Figura 17, sistema TRC-SiP para vigas.	40
Figura 18, sistema TRC-SiP para columnas.	41
Figura 19, imágenes OM & SEM de los compuestos FRCM; St=Fibra de acero; S=Fibra natural de sisal; SE=Revestimiento epoxi S; SV=Revestimiento de vinylester S; SP=Revestimiento de polyester S; SPU=Revestimiento de poliuretano S.	46
Figura 20, Resultados resistencia a tracción respecto al área transversal del compuesto.	48
Figura 21, Resultados resistencia a tracción respecto al área transversal del tejido.	49
Figura 22, Resultados del módulo de elasticidad de compuestos NFRCM.	51
Figura 23, Resultados del módulo de elasticidad de compuestos NFRCM.	52
Figura 24, Resultados del módulo de elasticidad de compuestos NFRCM.	53
Figura 25, tipos de fallas en la interfase FRCM-Sustrato de hormigón.	55

RESUMEN

Los avances en la ingeniería civil conllevan una evolución de los materiales que se utilizan en construcción, pues el principal objetivo de estos cambios es mejorar las características y propiedades de los mismos. Para lograr estos cambios, se llega al estudio de compuestos de refuerzo que ayudarán a los elementos estructurales. Estos materiales compuestos cuentan con la sostenibilidad necesaria en su producción para garantizar un impacto ambiental bajo. En este estudio se realizó una revisión bibliográfica acerca de los compuestos NFRCM. Se estudiaron los tipos de compuestos enfocándonos en los compuestos de matriz cementicia, las fibras de refuerzo vegetales y sus características. Se revisó los procesos de elaboración de estos materiales compuestos, así como las técnicas de colocación, sus propiedades e interacción reforzando elementos de concreto reforzado y por último sus potenciales usos. En esta investigación nos enfocaremos en los refuerzos en forma de tejidos bidireccionales de manera ortogonal embebidos en la matriz. Los resultados de este tipo de compuestos de refuerzo son positivos, aportando a los elementos mejores características frente a esfuerzos externos. El comportamiento de estos compuestos depende en gran parte de la interacción en las interfaces matriz-refuerzo textil y compuesto NFRCM-elemento de hormigón armado.

Palabras clave: Fibras, Materiales compuestos, Reforzamiento de estructuras de hormigón armado, Compuestos de matriz cementicia, Tejidos de fibras naturales, Fibras de origen vegetal, Tratamiento y recubrimiento de fibras.

Abstract

Advances in civil engineering involve one of the materials used in construction, since the main objective of these changes is to improve their characteristics and properties. To achieve these changes, it comes to the study of reinforcing compounds that help the structural elements. These composite materials have the necessary sustainability in their production to guarantee a low environmental impact. In this study, a bibliographical review about the NFRCM compounds was carried out. The types of composites were studied, focusing on cementitious matrix composites, vegetable reinforcing fibers and their characteristics. The elaboration processes of these composite materials were reviewed, as well as the placement techniques, their properties and interaction reinforcing reinforced concrete elements and finally their possible uses. In this investigation we will focus on the reinforcements in the form of bidirectional fabrics orthogonally embedded in the matrix. The results of this type of reinforcement compounds are positive, providing the elements with better characteristics against external forces. The behavior of these compounds depends largely on the interaction at the matrix-textile reinforcement and NFRCM compound-reinforced concrete element interfaces.

Keywords: Fibers, Composite materials, Reinforcement of reinforced concrete structures, Cementitious matrix compounds, Natural fiber fabrics, Fibers of vegetable origin, Fiber treatment and coating.



firmado electrónicamente por:

**ALEXANDER
PEREZ**

Reviewed by:
Lcdo. Alexander Pérez Herrero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 1757815798

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia los materiales de construcción han ido evolucionando, hasta el día de hoy son investigados constantemente, pues se busca el comportamiento y rendimiento más adecuado.

El hormigón posee un excelente comportamiento a compresión, pero a su vez se busca mejorar sus propiedades mecánicas a tracción y flexión. Es por eso que, con el pasar de los años se ha buscado compensar estas propiedades con diferentes refuerzos hasta llegar al hormigón armado. Sin embargo, este material presenta ciertas desventajas en cuanto a costos, vida útil del material, sostenibilidad, consumo de energía e impacto con el medio ambiente. Por esta razón se estudia la adición de materiales compuestos capaces de mejorar esas características sin producir un impacto ambiental negativo, de allí nacen los compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras naturales (NFRFCM).

La incorporación de compuestos NFRFCM en el hormigón armado nos brinda un balance claro de estos materiales y cómo influyen en la construcción, pues si bien se analiza la sostenibilidad de la producción de los materiales y las fibras de refuerzo, también se debe analizar la vida útil del material con la adición de las fibras, con lo cual también se tendría un impacto positivo por periodo de producción. Los usos que se podrían llevar a cabo con estos materiales son de gran importancia, ya que sus características mecánicas se ven mejoradas, así como su impacto en la producción, siendo los NFRFCM, la respuesta a los enfoques de hoy en día en los materiales de la construcción.

El cemento es un material primordial en la construcción y a partir de este se generan materiales constructivos, mismos que poseen diferentes propiedades que varían según el material de refuerzo. Los materiales que se adicionan a estos elementos mejoran las características del material, siendo esta la razón principal a lo largo de la historia, por lo cual se añadían refuerzos externos a los elementos de concreto, siendo los materiales compuestos de matriz cementicia los que apuntan a una mayor utilización y mejor acción compuesta por tratarse de una matriz que representa menor riesgo y mejor adherencia en este tipo de elementos.

La producción de los compuestos NFRFCM representan una reducción en el impacto ambiental por tratarse de un refuerzo de origen vegetal que proviene de recursos renovables y de fácil acceso. Al enfocarnos en la matriz, su impacto es mínimo por los espesores regulares utilizados en estos refuerzos y por su facilidad de curado.

Esta investigación está enfocada en el estudio de estos compuestos NFRFCM mediante una revisión bibliográfica acerca de estudios experimentales, analíticos y computacionales que presenten resultados de caracterización de sus propiedades, así como la interacción de estos compuestos en sus fases y en la interfase del compuesto y el elemento de concreto. Se estudió además sus usos y técnicas de aplicación en el campo de la ingeniería civil.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Realizar un estudio de revisión bibliográfica descriptiva acerca de los materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibra natural aplicados en estructuras de hormigón armado.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las materias primas utilizadas en la producción de matrices cementicias reforzadas con tejidos de fibra natural.
- Analizar procesos y técnicas utilizadas en la elaboración de materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibra natural aplicados en estructuras de hormigón armado.
- Conocer las principales propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales y su interacción con un estrato de hormigón armado.
- Definir los potenciales usos de los materiales de matriz cementicia reforzados con tejidos de fibras naturales en elementos de hormigón armado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fibras

Las fibras de reforzamiento se presentan como una solución ante ciertas desventajas que presente un material sea cual sea su tipo de matriz. Por ejemplo, en el caso de las matrices cementicias se logra mejorar la capacidad a tracción con la implementación de fibras de refuerzo. En algunos casos se coloca fibras de refuerzo con el objetivo de reafirmar características propias del material, citando el mismo ejemplo anterior, se puede mencionar como las fibras mejoran la capacidad a compresión de un material compuesto de matriz cementicia.

Las fibras se clasifican según (Ardanuy y Capdevila, 2011) en fibras naturales artificiales y sintéticas, como se puede ver en la **Figura 1**.

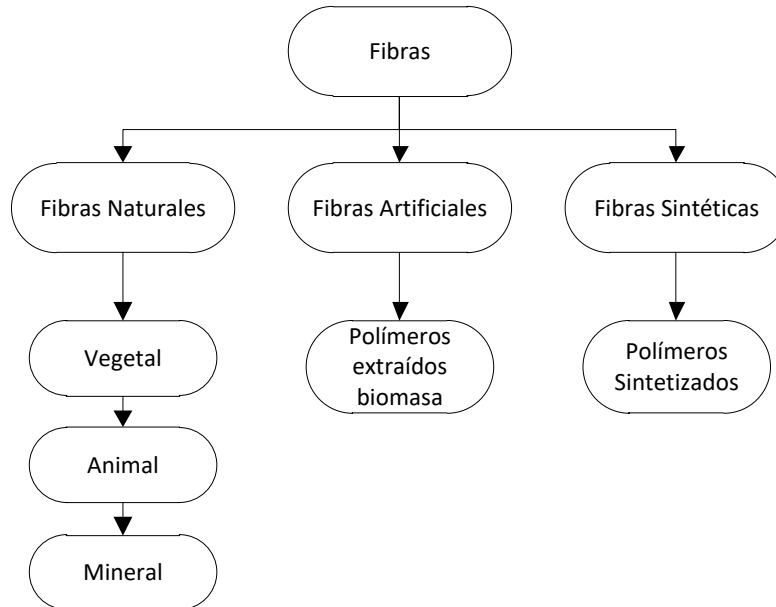


Figura 1. Clasificación de las fibras.

Fuente: Ardanuy y Capdevila, (2011) & Velásquez, Peláez y Giraldo, (2016)

El uso de fibras naturales en la elaboración de materiales compuestos es un tema de gran interés en la investigación de materiales y también en el crecimiento tecnológico para el desarrollo de nuevos materiales empleados en edificios y casas habitacionales (Anónimo, 1998, como se citó en López, Solís, Cortez y Coria, 2001).

Varios estudios (Awwad, Hamad, Mabsout & Khatib, 2011; O'Torgal & Jalali, 2011; Merta & Tschegg, 2012; Mukhopadhyay & Khatana, 2014) han mencionado el impacto ambiental que se ve reducido al incorporar fibras naturales en compuestos cementicios por el hecho de ser un recurso prácticamente reciclado y de abundancia en el medio, mencionan también la sostenibilidad en la producción de los hormigones reforzados con tejidos de fibras

naturales ya que se reduce la aplicación de otros materiales de alto impacto ambiental en su elaboración por su consumo de energía tan alto, dichos autores coinciden en el aspecto ecológico positivo que se genera con la incorporación de fibras naturales además de tratarse de recursos agrícolas renovables que como consecuencia desarrollan empleo en dichas zonas.

2.1.1 Clasificación de las fibras

Diversos autores analizan la clasificación de las fibras en función de sus características ubicación y dimensiones:

Las células de las plantas están rodeadas por una pared celular rígida, y esta es la principal característica que las distingue de las células de los animales.

En algunos tipos de células, las paredes celulares se agrandan para tener propiedades mecánicas superiores, que proporcionan el rendimiento estructural requerido de las plantas. Las dimensiones de estas fibras denominadas varían entre las diferentes plantas, pero su forma general es más a menudo alargada con longitudes en el rango 1-35 mm y diámetros en el rango 15-30 μm . En la perspectiva del compuesto reforzado, es mejor agrupar las fibras por sus longitudes como se muestra en la **Figura 2**. (Djafari, 2017, p. 60)

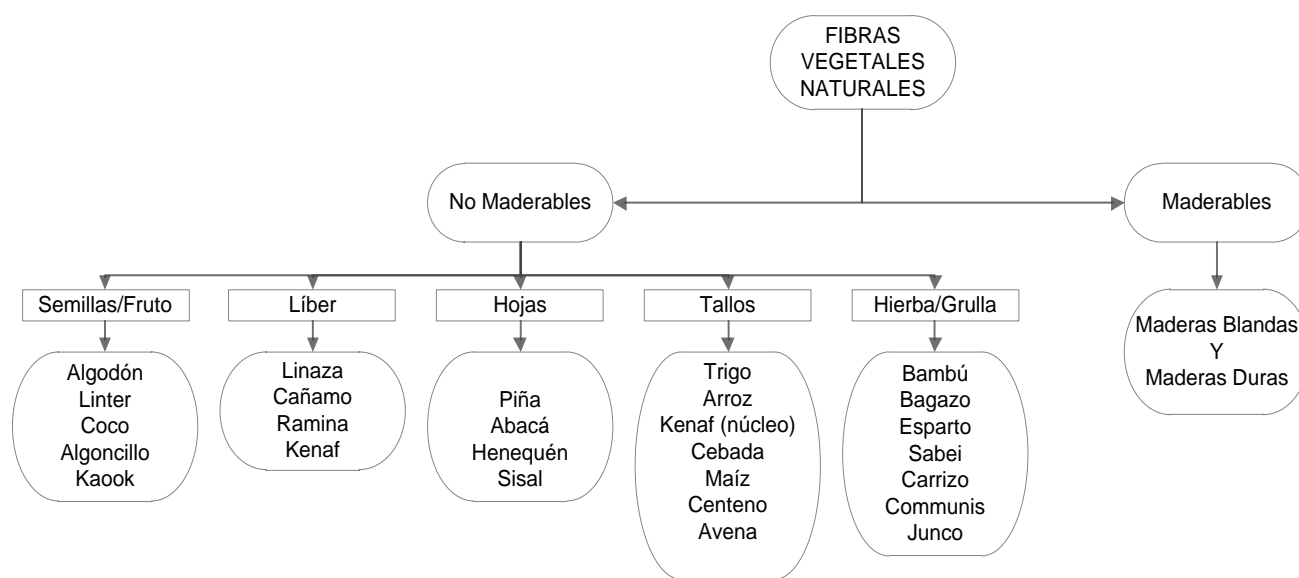


Figura 2. Clasificación de las fibras vegetales y naturales.

Fuente: Djafary Petroudy, (2017)

2.1.1.1 Fibras cortas

Fibras cortas (1-5 mm), que se originan típicamente de especies maderables y no maderables y típicamente utilizado para hacer compuestos con propiedades isotrópicas en el plano, es decir, compuestos con una orientación de fibra inespecífica (aleatoria). (Djafari, 2017, p. 60)

2.1.1.2 Fibras largas

Fibras largas (5-50 mm), que se originan típicamente de especies de plantas anuales no leñosas (p. Ej., Lino, cáñamo, yute) y se usan típicamente para hacer compuestos con propiedades anisotrópicas, es decir, compuestos con una orientación de fibra específica. (Djafari, 2017, p. 60)

2.1.2 Propiedades de las fibras

Es necesario conocer las características de las fibras naturales para su posterior análisis en la interacción que se produce con las matrices cementicias por lo cual se debe estudiar diversos ámbitos de sus propiedades.

Las fibras vegetales están constituidas por ligamentos fibrosos, que a su vez se componen de microfibrillas, dispuestas en capas de diferentes espesores y ángulos de orientación, las cuales son ricas en celulosa. Las diversas células que componen una fibra se encuentran aglomeradas por la mela intercelular, compuesta por; hemicelulosa, pectina y principalmente lignina. La región central de la fibra también puede presentar una cavidad, denominada lacuna misma que junto a los lúmenes son las responsables de la gran incidencia de poros en las fibras. (Quintero & González, 2006, p. 135)

A continuación, en la **Figura 3.** se muestra la estructura de la pared celular con detalles desde los más amplios hasta llegar a las uniones moleculares de la celulosa.

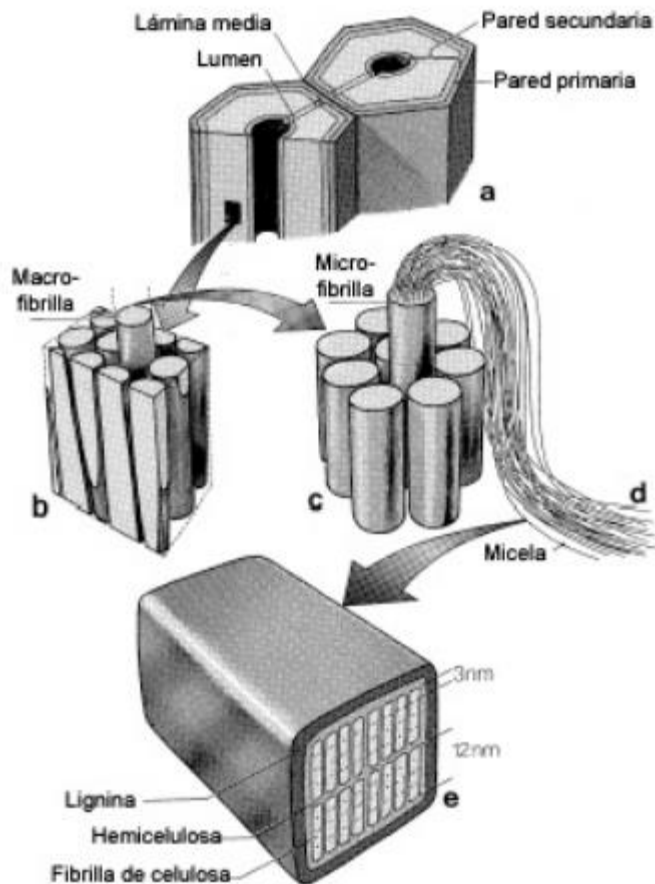


Figura 3, Representación esquemática de la pared celular.

Fuente: Hüttermann, (2001)

La estructura jerárquica de las fibras naturales confiere al material fibroso excelentes propiedades de rendimiento, es decir, una alta relación resistencia / peso. Las fibras se pueden obtener de plantas leñosas y no leñosas mediante procesos químicos, mecánicos y biológicos, así como mediante muchos procesos combinados. (Djafari, 2017, p. 60)

Las propiedades mecánicas de las fibras varían según su constitución, la cantidad de celulosa y la cristalinidad. También están influenciados por el DP de la celulosa (grado o índice de polimerización) y la orientación microfibrilar (Netravali, 2001).

La estructura celular de las fibras se forma de los componentes mencionados anteriormente, por lo cual lo podríamos llamar como un material natural compuesto, que, de igual manera, presenta las mismas características que un material compuesto realizado por el hombre, pues se podría deducir que las fibras naturales son materiales compuestos anisotrópicos, es decir, que dependiendo de la ubicación de sus componentes tendrá un comportamiento diferente en cada eje.

2.1.2.1 Composición de fibras vegetales.

Las propiedades ubicadas en la pared celular, nos brindan características que son de gran ayuda para predecir cómo reaccionará la fibra al entrar en contacto con una matriz cementicia. A continuación, los porcentajes de la estructura de distintos tipos de fibras en la **Tabla 1**.

Tabla 1, Estructura porcentual de fibras vegetales.

Propiedades	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Extractivas (%)	Ceniza (%)	Referencia
Sisal	11	73.11	13.33	1.33	0.33	(Arsene , 2003)
Algodón	-	87.5	4.5	-	-	(Guerrero et al., 2011)
Coco	31.84	26.26	15.79	5.26	4.72	(Arsene , 2003)
Hoja de piña	12.34	44.04	41.72	-	-	(Mendoza, Velásquez y Gómez et al., 2020)
Yute	11.8	64.4	12	1.6	-	(Doan et al., 2006, como se citó en Ochoa, Rodríguez y Reina,
Cáñamo	10	68	15	-	-	(Indram, y Raj , 2014)
Plátano	24.84	25.65	17.04	9.84	7.02	(Arsene , 2003)
Palma de piasava	45	28.6	25.8	-	-	(Indram y Raj, 2014)
Palma de aceite	17.5	65	10.12	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Linaza	2	64.1	16.7	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Abacá	10	59.5	22.5	-	-	Dittenber y GangaRao , 2011)
Ramio	0.6	76.8	14.85	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Kenaf	21.5	51	10.5	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Alfa	14.9	45.4	38.5	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Bagazo	21.8	41.7	28	4	3.5	(Arsene , 2003)
Palmira	-	46	42	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Bambú	10.15	73.83	12.49	-	-	(Indram y Raj , 2014)
Agave	4.85	68.42	4.85	-	-	(Indram y Raj , 2014)

Nota: En esta tabla se muestra los valores en porcentajes de los componentes ubicados en las diferentes capas de las fibras vegetales en algunos casos se colocaron valores promedio según los autores de los estudios.

Fuente: Benitez W.

2.1.2.2 Propiedades de las fibras naturales.

Las propiedades de las fibras se clasifican en físicas y mecánicas. A continuación, se presenta la **Tabla 2.** con las propiedades de las fibras más utilizadas generalmente.

Tabla 2, Propiedades físicas y mecánicas de las fibras.

Propiedades	Gravedad específica (g/cm^3)	Absorción de agua (%)	Fuerza de tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Referencia
Sisal	1.37	11	347-378	15.20	(Arsene , 2003)
Algodón	1.5	8-25	393-773	26.5	(Arsene , 2003)
Coco	1.18	9.38	95-118	2.80	(Arsene , 2003)
	1.15		108-252	4.60	(Sathishkumar , 2012)
Hoja de piña	1.40	-	413-1627	34-82	(Indran & Raj, 2015)
Yute	1.46	-	393-800	10-30	(Omrani et al., 2016)
Cáñamo	1.50	8.5-10.5	900.00	34.00	(Arsene , 2003)
	1.07		389-900	35.00	(Placet, 2009)
Plátano	1.03	40.7	384.00	20-51	(Arsene , 2003)
	1.35		529-759	17.85	(Indran & Raj, 2015)
Palma de piasava	1.05	34-108	143.00	5.60	(Arsene , 2003)
	1.40		134-143	1.07-4.59	(Dittenber & Gangarao,2012)
Palma de aceite	0.7-1.55	-	80-248	0.5-3.2	(Dittenber & Gangarao,2012)
Linaza	1.38	-	745-1145	43.9-61.1	(Christophe Baley & Bourmaud, 2014)
Abacá	1.50	-	400-980	6.2-20	(Dittenber & Gangarao,2012)
Hierba Cesar	1.41	18.2	300-500	10.0-40.0	(Arsene , 2003)
Ramio	1.50	-	220-938	44-128	(Indran & Raj, 2015)
Kenaf	1.40	-	223-930	14.5-53	(Dittenber & Gangarao,2012)
Alfa	0.89	-	350.00	22.00	(Indran & Raj, 2015)
Bagazo	1.25	-	222-290	17-27.1	(Dittenber & Gangarao,2012)
Palmira	1.09	-	180-215	7.0-60.0	(Indran & Raj, 2015)
Bambú	1.16	14.5	73-505	10.0-40.0	(Arsene , 2003)
	0.6-1.1		140-800	11.0-32.0	(Dittenber & GangaRao,2012)
Agave	-	-	66-198	0.89-2.77	(Bezazi , 2014)

Nota: En esta tabla se encuentran las propiedades de las fibras que influyen en su comportamiento al ser agregadas a la matriz cementicia.

Fuente: Benitez W.

2.2 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos materiales que tienen su origen a partir de la combinación de dos o más materias primas, dicha fusión debe ser física, los materiales que intervienen deben ser insolubles entre sí, además de no fusionarse por completo. Este nuevo material obtendrá sus propiedades en función de sus elementos constitutivos, las reacciones posteriores entre los mismos y su correlación entre fases.

Los materiales compuestos constan de dos fases principales, la primaria y la secundaria. La fase primaria o continua se basa y está constituida por la matriz, se refiere cuando el material es completamente isotrópico, es de allí de donde nace su nombre y dentro de ella se incorpora la fase secundaria, que es el refuerzo, mismo que dependiendo de su ubicación provoca anisotropía en el material compuesto, pues así lo detallan varios estudios. (Besednjak, 2005; Callister, 2018; Gilbercero et al., 2010; Groover, 1997; Salán, 2005).

Se menciona también una fase infiltrada, la cual se presenta cuando la matriz forma una primera fase porosa y la segunda fase que es el refuerzo la rellena, un ejemplo son los rellenos metálicos, los cuales infiltran los poros de las piezas constituidas de polvos metalúrgicos. Por último, se encuentra la interfase que representa el enlace que se debe generar entre la fase uno y la fase dos, en algunos casos se presenta una interfase directa entre la matriz y el refuerzo, mientras en otros casos se debe añadir otro material o ingrediente para promover la unión entre fases, es por eso que la interfase se la conoce en algunos casos como adhesivo. (Groover, 1997). A continuación, la **Figura 4.** nos muestra las diferentes fases de un material compuesto.

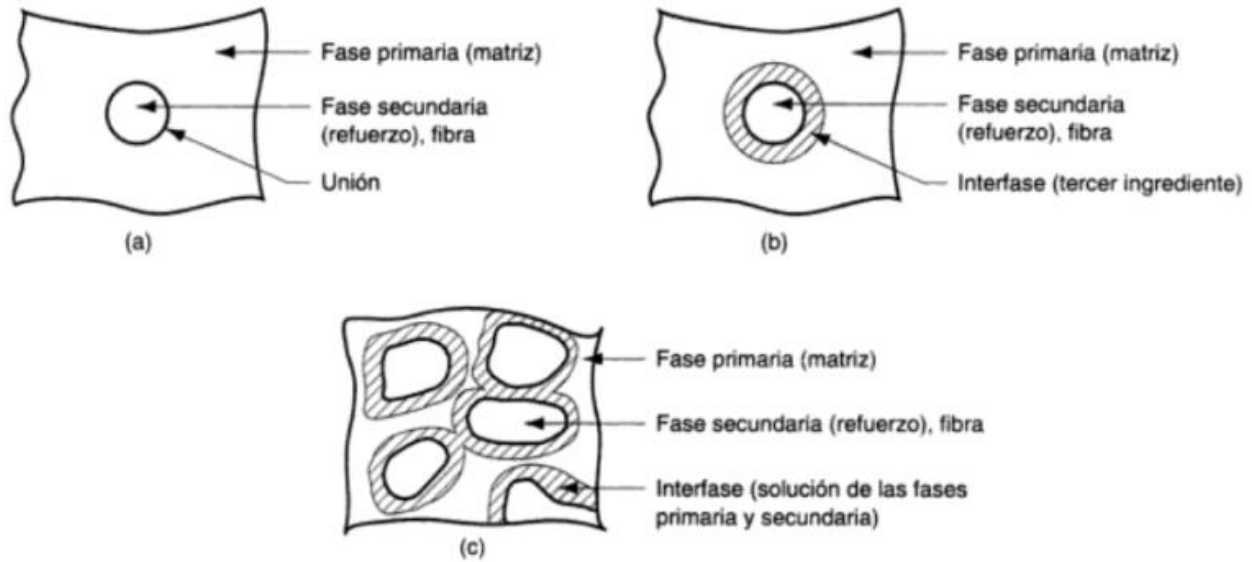


Figura 4, Unión e interfases entre las fases de un material compuesto: (a) unión directa entre la fase primaria y la secundaria (b) adición de un tercer componente para unir las fases y formar una interfase y (c) formación de una interfase por solución de las fases primaria y secundaria en sus límites.

Fuente: Groover, (1997)

Varios estudios (Besednjak, 2005; Pérez, 2014), coinciden que la ubicación del refuerzo en los materiales compuestos es de gran influencia e importancia, como se puede ver en la **Figura 5.** y **Figura 6.** ya que esta ubicación otorgará las principales propiedades mecánicas del nuevo material.

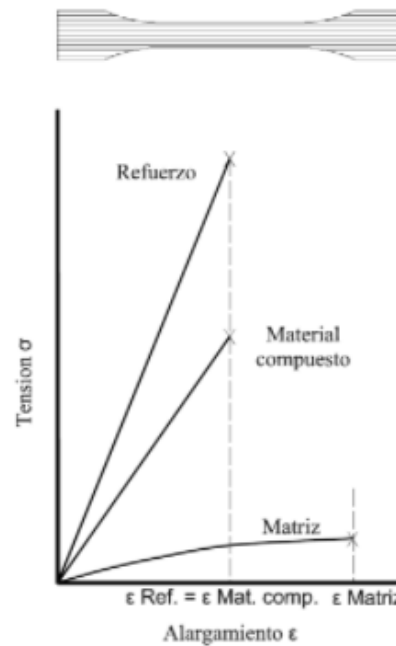


Figura 5, Probeta ensayada en dirección del refuerzo-Diagrama esfuerzo deformación (solicitación longitudinal de las fibras).

Fuente: Besednjak, (2005)

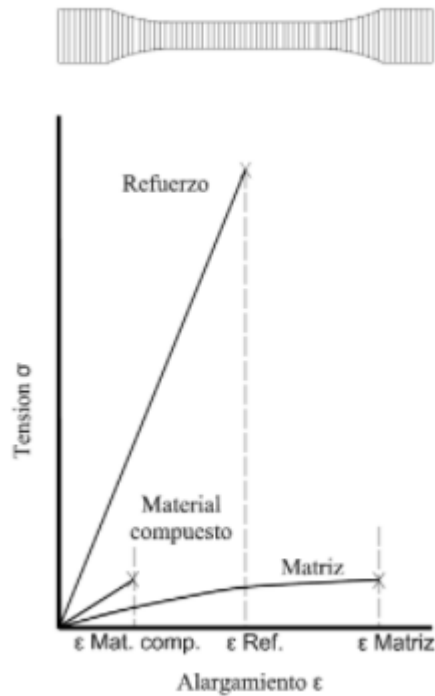


Figura 6, Probeta ensayada en dirección transversal del refuerzo-Diagrama esfuerzo deformación (solicitud transversal de las fibras).

Fuente: Besednjak, (2005)

El refuerzo del material compuesto se halla embebido en un material continuo denominado matriz, que actúa como: aglutinante, protector y se encarga de repartir y transmitir las cargas al refuerzo. Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, los materiales compuestos ofrecen ventajas determinantes en comparación con los materiales estructurales convencionales, como entre otras la posibilidad de generar estructuras de geometrías complejas. (Pérez, 2014, p. 19-20)

2.2.1 Matrices

2.2.1.1 Clasificación de los tipos de matrices

Dentro de los materiales compuestos se puede realizar una clasificación en función de sus matrices, según Besednjak (2005) las podemos clasificar en tres grupos principales que son: materiales compuestos de matriz metálica, de matriz cerámica y de matriz polimérica.

2.2.1.1.1 Compuestos de matriz metálica

Los compuestos de matriz metálica son compuestos basados en el metal como matriz y que son reforzados por lo general con segundas fases, varios estudios (Groover, 1997; Salán, 2005) mencionan a las fases de refuerzo más comunes que son las cerámicas en partículas

(MMC cermets) o las fibras de distintos materiales como las de otros metales, carbono, boro y cerámicos.

Las aleaciones metálicas más comunes son las de aluminio, las de cobre y las de titanio, reforzadas con diferentes materiales o con fibras metálicas en porcentajes menores al 20%, en caso de buscar un material resistente a altas temperaturas lo común es el uso de aleaciones de níquel o cobalto. (Salán, 2005)

2.2.1.1.2 Compuestos de matriz cerámica o cementicios

Los compuestos de matriz cerámica (CMC), principalmente tratan de mantener sus buenas características y compensar sus debilidades, según varios estudios (Besednjak, 2005; Callister, 2018; Groover, 1997; Salán, 2005) las características que se busca mantener son: la resistencia a compresión, la dureza, la rigidez e incluso la baja densidad. Mientras que con las fases de refuerzo se intenta compensar la fragilidad de la matriz, su baja tenacidad y resistencia a tensiones.

Los CMC son los compuestos menos habituales, pero se debe destacar al hormigón, ya que su uso es muy habitual y se consideraría como el CMC más conocido. (Salán, 2005)

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

En la construcción, el cemento como material ocupa el segundo lugar por detrás del agua, por lo cual se busca un mejor comportamiento al combinarlo ya que es de gran importancia. Dependiendo el material de la segunda fase se presenta diferentes reacciones con el cemento, provocando fenómenos distintos y, por ende, distintos materiales compuestos como los mencionados anteriormente.

2.2.1.1.3 Compuestos de matriz polimérica

Los compuestos de matriz polimérica son los más comunes, según estudios (Besednjak, 2005; Callister, 2018; Gilbercero et al., 2010; Groover, 1997; Salán, 2005) mencionan a estos compuestos como materiales con buenas propiedades mecánicas, estos compuestos pueden ser reforzados con: vidrio, fibras de carbono y demás tipos de fibras. Coinciden en que es el material compuesto por excelencia, por su gran producción y estudios, ya que presenta ventajas al ser resistente a la corrosión, a los agentes químicos y a su maleabilidad.

Los tipos de refuerzos que se pueden utilizar en la segunda fase de este compuesto son comúnmente utilizados en forma de fibras, que se distribuyen en capas alternas, dichas fibras regularmente son de vidrio o de carbono, además existe otro tipo de refuerzo, no fibras, al cual lo llaman rellenos, entre estos últimos los más comunes son el polvo de mica, el talco, el negro de humo y el serrín. (Salán, 2005)

2.2.2 Refuerzos

Los refuerzos que son incorporados en la segunda fase son los encargados de contribuir con nuevas propiedades al material compuesto. Estos refuerzos se pueden presentar de diversas formas. Según (Gilbercero et al., 2010; Salán, 2005) se puede obtener compuestos con refuerzos de fibras, compuestos con refuerzos de partículas y compuestos con refuerzos estructurales. Se menciona también el origen de las fibras, como las fibras sintéticas que son las más utilizadas y estudiadas, mientras que las fibras naturales carecen de suficientes estudios como material de refuerzo.

Cada uno de los tipos de refuerzo mencionados anteriormente, tienen una subclasificación y características, como se aprecia en la **Figura 7**. Estas características aportarán las principales propiedades del material compuesto que se obtendrá.

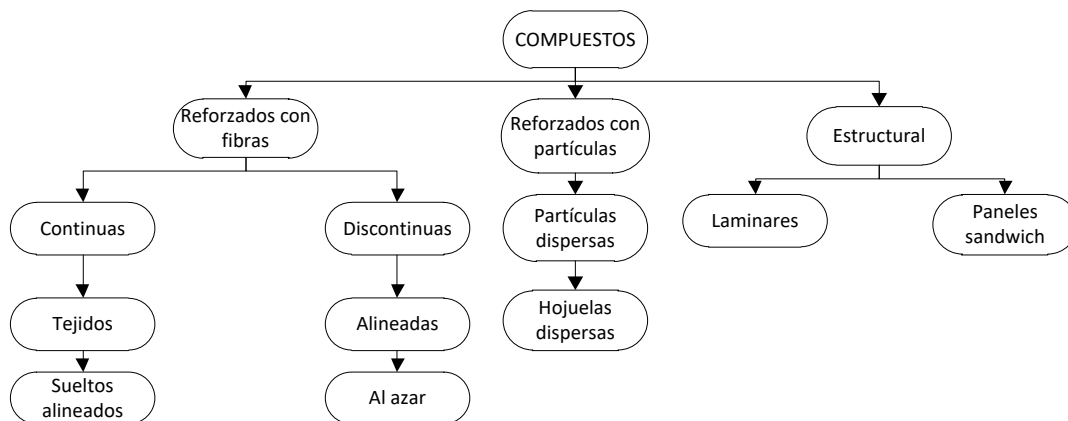


Figura 7. Clasificación de los compuestos según su refuerzo.

Fuente: Benítez W., basado en (Besednjak, 2005; Callister, 2018; Gilbercero et al., 2010; Groover, 1997; Salán, 2005)

2.2.2.1 Compuestos reforzados con fibras

Estos compuestos reforzados mediante fibras, son diseñados para obtener resistencias altas guardando un peso ligero, por lo cual es de gran importancia la resistencia a la tracción, así como el módulo de elasticidad de las fibras que se van a colocar. (Besednjak, 2005; Gilbercero et al., 2010). Cuando el material de refuerzo es de prestaciones altas se ve en la necesidad de realizar un refuerzo de fibras continuas para poder aprovechar al máximo sus propiedades mecánicas. Otro objetivo de los refuerzos de fibras continuas es el aprovechar la ubicación de las fibras, en función de los esfuerzos a los cuales va a ser sometido el material compuesto, aprovechando así la anisotropía producida por el refuerzo. (Gilbercero et al., 2010).

En los compuestos reforzados con fibras se considera a la segunda fase como el constituyente principal, por lo cual el material compuesto obtiene sus principales características en base al refuerzo. Las fibras de refuerzo se comercializan mediante hilos constituidos cada uno de filamentos, generalmente de sección transversal circular. Los hilos pueden presentar

diferentes formas de refuerzo, como se puede observar a continuación en **Figura 8**. En el caso de las fibras continuas, que son fibras de tamaños largos, se pueden obtener refuerzos como tejidos o dispuestos paralelamente, y en el caso de las fibras discontinuas, que son segmentos de fibras de tamaños cortos, se puede presentar ordenados unidireccionalmente, o como un material disperso sin importar su ubicación, obteniéndose un material isotrópico. (Gilbercero et al., 2010; Groover, 1997)

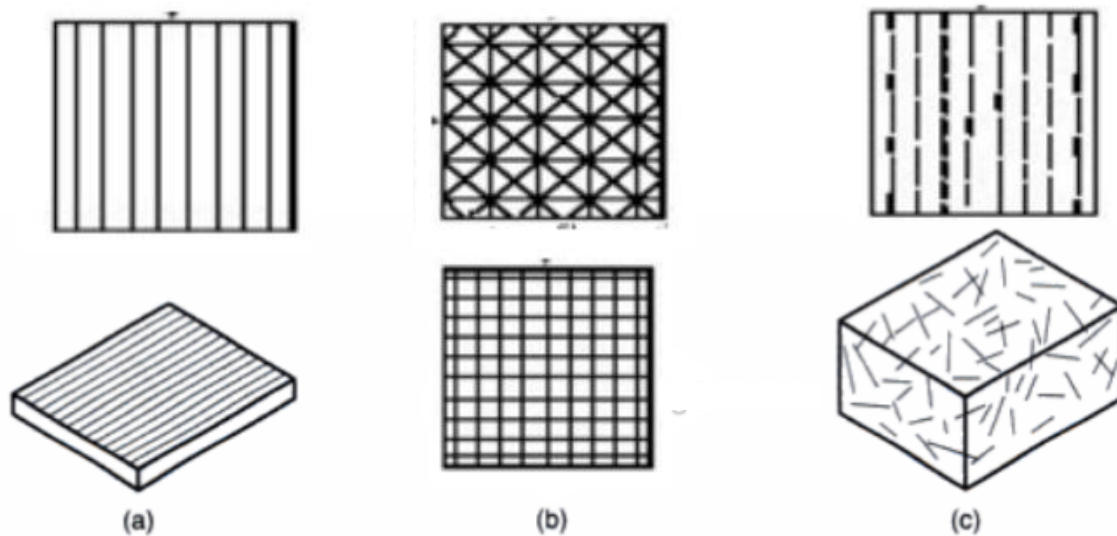


Figura 8, Disposición de refuerzos en fibras. (a: Fibras continuas libres ubicadas en paralelo), (b: Tejido de fibras continuas) y (c: Fibras discontinuas ubicadas unidireccionalmente y fibras discontinuas como material disperso)

Fuente: Groover, (1997)

2.2.2.2 Compuestos reforzados con partículas

Los compuestos reforzados con partículas están constituidos por pequeños volúmenes de sólidos en forma de partículas como segunda fase. Estas partículas varían en tamaño, desde lo microscópico hasta lo macroscópico, y su eficacia depende de la distribución de las mismas dentro de la matriz. La interfase en estos compuestos es de gran importancia, pues al igual que en los compuestos reforzados con fibras, si la interacción de cohesión entre matriz- refuerzo es adecuada, mejor será la transmisión de esfuerzos entre las dos fases. (Groover, 1997; Salán, 2005).

La capacidad de mejora que puede aportar el refuerzo a la matriz depende del tamaño de las partículas, de la distribución y de la proporción de las mismas. Así la eficacia de estos refuerzos es inversamente proporcional al tamaño de la partícula y directamente proporcional a la fracción de volumen en el compuesto. (Salán, 2005).

Las hojuelas son otro tipo de reforzamiento que se definen básicamente como partículas bidimensionales, una representación de este refuerzo se puede apreciar en la **Figura 9**. Dos ejemplos de estas partículas son la mica y el talco, usados generalmente como refuerzo en los plásticos. (Groover, 1997)

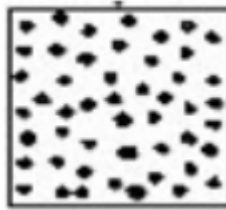


Figura 9, Refuerzo con partículas dispersas.

Fuente: Lara et al., (2018)

2.2.2.3 Compuestos con refuerzo estructural

En esta clasificación de materiales compuestos la fase secundaria se coloca en capas reforzadas o como materiales puros embebidas en la matriz. Existen dos tipos de refuerzos estructurales estudiados, los laminares y los tipos sándwich. La combinación de las dos fases presenta una gran superioridad a la que se obtiene por separado. (Groover, 1997; Salán, 2005).

Sin embargo, los compuestos pueden tomar formas alternativas que no se ajustan a este modelo; algunos de ellos son de considerable importancia comercial y tecnológica. (Groover, 1997)

Los compuestos laminares están formados por diferentes capas de materiales embebidos en la matriz. Existen refuerzos donde todas las láminas colocadas son del mismo material. Sin embargo, también existen refuerzos combinados, es decir con láminas de diferentes materiales o incluso combinadas con tejidos. Así también se menciona compuestos que contienen materiales de refuerzo previamente combinados. (Groover, 1997; Salán, 2005).

Los compuestos tipo sándwich, en algunos casos, se los diferencia como un tipo de compuesto de refuerzo laminar. Se trata de la ubicación paralela de dos tapas de gran resistencia y en el medio la matriz como relleno. En la mayoría de los casos, dicho relleno es de baja densidad. Los materiales más comunes dentro de estas fases son los metales o las resinas, tales como: laminas y relleno de espumas, cementos, cauchos o estructuras metálicas de nidos de abeja. (Groover, 1997; Salán, 2005). En la **Figura 10**. se muestra la representación de estos tipos de refuerzo.

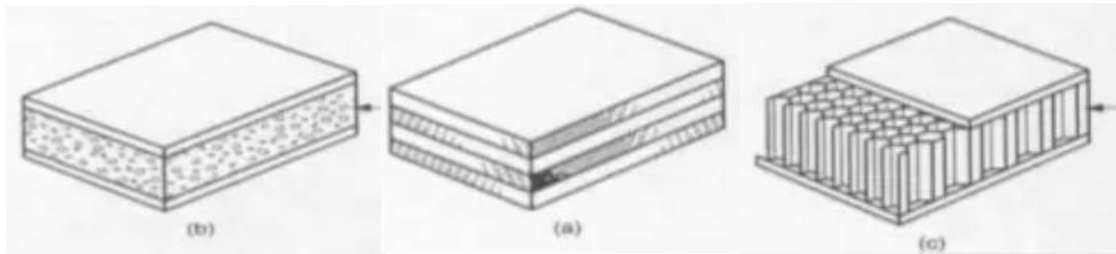


Figura 10, *Compuestos con refuerzo estructural. (a) Estructura laminar convencional, (b) Estructura sándwich con relleno de espuma (c) Estructura sándwich de panel.*

Fuente: Groover, (1997)

2.3 Sistemas FRCM/TRM

Estos sistemas de material compuesto se presentan como una alternativa a los FRP (polímeros reforzados con fibras) que son los más comúnmente utilizados en todo tipo de industria. Los TRM son compuestos de mortero reforzado con textiles, de ahí sus siglas; sin embargo, también es muy común encontrar el acrónimo FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) que hace referencia a una matriz cementicia reforzada con tejidos. La principal diferencia es la particularidad a la que hace referencia los compuestos TRM, ya que menciona exclusivamente al mortero como su matriz, mientras que los FRCM se refieren a cualquier tipo de matriz cementicia.

Los TRM y FRCM presentan las mismas ventajas que un FRP con una alta relación resistencia-peso. La sustitución de una matriz orgánica de resinas en los FRP por una matriz inorgánica de mortero en los TRM o FRCM da como resultado mayor facilidad en la instalación y mejor resistencia al fuego. (De Felice, 2018; Pérez, 2014).

Para obtener un material compuesto monolítico se debe asegurar el flujo y contacto adecuado entre la matriz y el refuerzo. La forma más eficaz de lograr esto es a través de la aplicación de tejidos como refuerzo, ya que esto permite una cohesión adecuada del mortero entre las celdas que componen el tejido. (Pérez, 2014).

Los compuestos de matriz cementicia reforzados con tejidos muestran una diferencia en comparación con otros compuestos, pues los compuestos TRM trabajan a tracción pura ya que la matriz no presenta ductilidad como en el caso de los compuestos FRP. De esta manera, el mortero es el material que se fisura primero y es el punto de partida para el trabajo de las fibras, es decir que el tejido comienza a soportar las cargas en el momento que el mortero comience a fisurarse. (De Felice, 2018; Pérez, 2014).

2.3.1 Materias primas

Como se ha mencionado en el **apartado 3.2**, los materiales compuestos constan de diferentes fases, mismas que poseen diferentes características. En el caso de los compuestos de matriz cementicia se busca una interfase adecuada entre la matriz y el refuerzo, por lo cual las materias primas aumentan o son modificadas para lograr este objetivo.

2.3.1.1 Materia prima en matriz

Para la elaboración del mortero como matriz del compuesto se necesita de uno o más aglomerantes inorgánicos, áridos, agua y en algunos casos aditivos. (AFAM, 2003). Según (PCA, 2016), el aglomerante generalmente utilizado es el cemento portland tipo I, el cual es de uso general y es aplicable en caso de tener fibras recubiertas; también se puede utilizar cemento portland con caliza. Los áridos deben ser analizados y ensayados con anterioridad, en el caso de buscar la generación natural de una solución que sirva de interfase entre la matriz y el refuerzo se debe buscar un tipo de cemento que no afecte en la adhesión interfacial, es decir un cemento que necesite de menos dosificación de agua, que genere menos temperatura en su reacción y que su alcalinidad sea menor, para así conservar la interacción fibra matriz. Algunos de los tipos de cementos son: Cemento portland Tipo II, Tipo IV, el IP, IS y sobre todo el IT que es un cemento compuesto ternario. Todos estos cementos reducen la cantidad de sílice (SiO_2) o alúmina (Al_2O_3), compuestos que generan la activación alcalina de los aluminosilicatos.

2.3.1.2 Materia prima en interfase

En el caso de los sistemas FRCM/TRM se utilizan distintos materiales de recubrimiento en las fibras para mejorar su interfase; principalmente y con mejores resultados se utilizan resinas que mejoran la unión interfacial entre las fibras y la matriz (Ahmad & Fan, 2017; Mercedes et al., 2018)

Las resinas que son utilizadas son comúnmente resinas epoxi, o en otros casos, resinas de polyester y vinyl ester, presentando diferentes resultados al interactuar con una matriz alcalina; siendo la última la que presenta resultados más desfavorables por su absorción de agua. (Jaume et al., 2020; Mercedes et al., 2018)

Las materias primas que componen las resinas están basadas en los epóxidos, generalmente el bisfenol A, que reaccionan con fenoles, aminas o poliácidos. Estas reacciones son contraladas mediante catalizadores y aceleradores. (Besednjak, 2005).

Son utilizados también el aceite de linaza, parafina, cera de abejas (Merta & Tschegg, 2012), silicato de sodio (Na_2SiO_3), sulfato de magnesio ($MgSO_4$) mencionados en los estudios de (Olivito et al., 2014; Torgal & Jalali, 2011), MPTS (3- metacriloxipropiltrimetoxisilano) y APTS (3-aminopropiltriétoxosilano) referidos por (Torgal & Jalali, 2011).

2.3.2 Tejidos textiles de refuerzo

Dentro de los compuestos FRCM se mencionan a las fibras de refuerzo colocadas en formas de tejidos específicamente cuando se trata de telas de fibras secas. Los avances en la ingeniería textil como refuerzo abarcan el estudio de diferentes mecanismos. Mercedes et al., (2018) menciona textiles como telas bidimensionales y textiles tridimensionales de carbono, vidrio resistente a álcalis (AR), PBO, aramida, basalto, acero y vegetal.

El énfasis de los textiles de refuerzo se basa en fibras continuas, dispuestas en la dirección de las tensiones, por lo cual las propiedades mecánicas de los compuestos dependen en gran porcentaje de los tejidos y de su configuración. (ACI 549.4R-20, 2020)

Los mecanismos de montaje de los textiles varían principalmente en función del tipo de hebra o fibra y del anclaje mecánico que se busque en el material compuesto. Existen distintos tipos de montaje como los mostrados en la **Figura 11**.

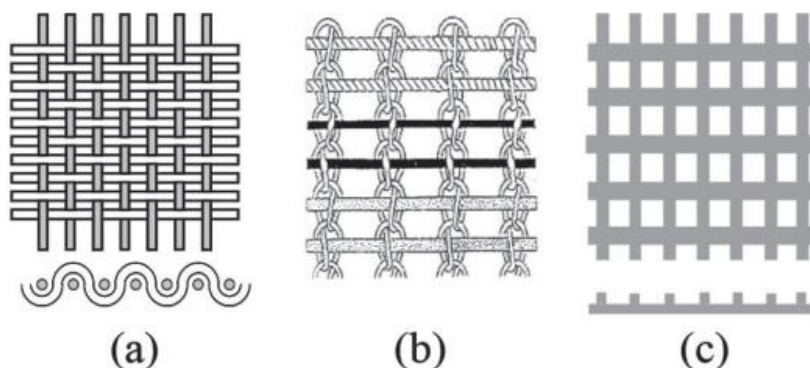


Figura 11, Tipos de montajes de tejidos de refuerzo; a. Tejido; b. De punto; c. Unido
Fuente: ACI 549.4R-20, (2020)

3. METODOLOGÍA

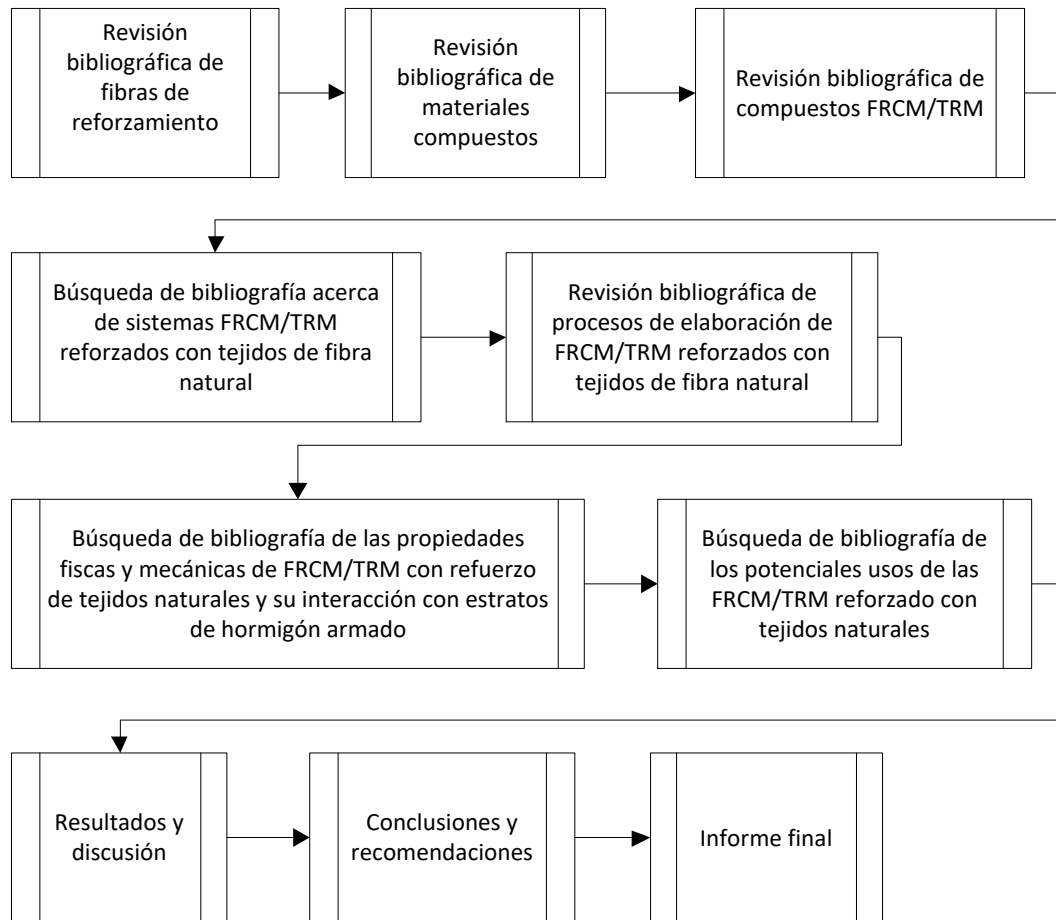


Figura 12, Diagrama de metodología de la investigación.

Fuente: Benítez W.

En la **Figura 12.** se puede apreciar el diagrama de la metodología, este diagrama contiene la secuencia de pasos realizados en este estudio de revisión.

En el presente trabajo de investigación se realizó una recolección de información sobre la problemática a tratar, documentos de investigación relacionados y propios del tema para obtener mayor información, así como literaturas de temas complementarios relacionados, algunas fuentes de información se seleccionaron de las citas de estudios revisados siempre y cuando tengan relación con la investigación de este estudio. Para la búsqueda de estas literaturas se utilizó herramientas de búsqueda en línea como Scopus, ScienceDirect, WorldWideScience, Microsoft académico, Google-Academic, Scielo, Researchgate, LibraryGenesis, refseek, entre otras. Se obtuvo en total 99 bibliografías diferentes, las cuales nos ayudaron para realizar este estudio.

Se realizó una revisión bibliográfica de los datos e investigaciones acerca de las fibras naturales, sus características y propiedades mecánicas. Mediante una metodología de análisis de la información científica, se procedió con el desglose de sus propiedades, clasificación y métodos de extracción. Para el caso de las propiedades, se hizo una recolección de información para obtener los datos necesarios de la mayor cantidad de fibras naturales posibles.

De igual manera, en la revisión de la bibliografía de materiales compuestos, se analizó toda la información recolectada de diferentes autores buscando las coincidencias que afirmarían los conceptos expuestos en esta investigación. Se buscó información relevante acerca de sus componentes, con palabras clave como: “matriz, fases, interfases y refuerzo”. Se puso un mayor énfasis en la búsqueda de información que estudie las interacciones de los elementos del material compuesto de matriz cementicia, su clasificación en función de su matriz y de su refuerzo.

La búsqueda y estudio de bibliografía acerca de materiales FRCM/TRM se realizó con un enfoque a sus materias primas, su uso y sus características, en el caso de los materiales FRCM/TRM con refuerzo de fibras naturales se realizó una comparación con los compuestos comúnmente utilizados, además de buscar en otras bibliografías la interacción de las fibras naturales dentro de una matriz cementosa específicamente. Mediante un método deductivo y de comparación de fuentes de información se logró identificar los procesos específicos de elaboración y la interacción producida en los materiales FRCM/TRM.

Además, se realizó un contraste entre las propiedades mecánicas de los sistemas FRCM/TRM reforzados con fibras sintéticas y los reforzados con fibras naturales, tomando en cuenta sus diferencias en el proceso de elaboración. Así también se estudiaron los principales modos de falla de estos materiales compuestos y se analizaron las causas por las cuales el reforzamiento con fibras naturales es poco estudiado y aplicado en la actualidad.

Toda esta información recolectada se procesó mediante métodos de análisis, descomponiendo en varios elementos nuestras directrices de estudio. Estos fundamentos teóricos además se han confirmado y aplicado a nuestra problemática de forma que nos han servido para llenar los vacíos de conocimiento acerca de los materiales compuestos de matriz cementicia reforzado con fibras naturales, sus propiedades, características, factibilidad de operación, procesos de fabricación y su interacción con elementos de hormigón armado.

3.1 Obtención de materias primas y el compuesto final.

En la elaboración de los FRCM se debe tomar en cuenta la producción de los diferentes materiales constitutivos de dichos compuestos, así como sus procesos y metodologías utilizadas previo a su formación. Además, se deben revisar las técnicas aplicadas por diversos autores para la elaboración final de los compuestos FRCM con tejidos de fibra natural vegetal.

3.1.1 Extracción de las fibras naturales

La extracción de las fibras de su estado natural difiere principalmente en dependencia del tipo de fibra y de su procedencia. Como lo menciona Villareal (1988), las fibras provienen de la corteza (Tallos), hojas y de las semillas (Fruto, Líber, Grulla) de los vegetales. En el caso de la grulla, el bambú, el bagazo etc., se clasifican con el tipo de extracción de semillas, ya que su extracción es similar debido a la semejanza de la composición de la matriz vegetal y la fibra vegetal. En la actualidad se realiza la misma clasificación, añadiéndole la creación de cadenas inducidas de celulosa por levaduras o redes de celulosa y hemicelulosa, que actúan en las matrices como un tejido. Un ejemplo de estas fibras se puede encontrar en el estudio realizado por Sethunarayanan et al., (1989), donde se realiza una incorporación de levadura a la matriz de hormigón armado, formando cadenas similares a las cadenas mencionadas por Djafari, (2017) en su estudio de las propiedades de las fibras naturales.

Los tipos de extracción que se realizan son los de procesos mecánicos, químicos, biológicos y combinados, que dependerán del tipo y de la procedencia de la fibra. Varios estudios (Armas et al., 2016; Bezazi et al., 2014; Herrera, 2015 y Quintero et al., 2016) mencionan que las propiedades de las fibras son afectadas de acuerdo al tipo de extracción que se ha realizado.

3.1.1.1 Extracción mecánica

La extracción mecánica se puede llevar a cabo de forma artesanal e industrializada. Las fibras aptas para este tipo de extracción son aquellas fibras que están recubiertas por una matriz fácil de distinguir, misma que tendrá propiedades lo más alejadas a las fibras que se extraerán.

Este tipo de extracción se puede presentar en cortezas, semillas y hojas. En el caso de las cortezas, es la extracción más común; sin embargo, se puede dar en semillas o en cogollos de semillas de algún vegetal como la yuca, así lo menciona Villareal (1988), y de igual forma en hojas de cogollo como el agave.

3.1.1.2 Extracción química

Generalmente, la extracción química de las fibras no es usada para producir fibras que se usarán en materiales compuestos, pero se puede llegar a analizar en casos particulares. Esta extracción se presenta cuando la matriz que contiene a las fibras está conformada de tejidos similares a los de la fibra, como el ramio que, pese a que se puede realizar una extracción combinada, el tiempo de exposición se prologaría. La aplicación de las sustancias se definirá en función de la utilidad a futuro de la fibra.

3.1.1.3 Extracción biológica

Este tipo de extracción se puede aplicar a fibras que estén contenidas en matrices que difieran en sus propiedades, como el primer caso, y que además dicha matriz sea susceptible a

descomposiciones controladas, sin afectar a las fibras. De igual forma, un ejemplo de procesos de extracción biológica se puede dar en el caso de las fibras de corteza y algunas de hoja. Dicho proceso trata principalmente de llevar cabo una descomposición de la matriz. Para separar las fibras de la misma, se utilizan exposiciones a la intemperie, entierros de la materia prima y sumersión en agua, lo cual acelera la descomposición.

3.1.1.4 Extracción combinada

La extracción combinada es uno de los mejores procesos utilizados, ya que optimiza tiempos y, sobre todo, después de un adecuado tratamiento, reduce el deterioro de las propiedades de las fibras. Existen diversas combinaciones, entre las más comunes están:

- Extracción termo-mecánica.
- Extracción biológico-mecánico.
- Extracción químico-mecánica.

3.1.1.5 Efectos de la extracción

Se han realizado estudios para evaluar las fibras después de su extracción. Se han encontrado diferencias notorias en función del tipo de extracción. Los componentes químicos que atacan a la hemicelulosa son principalmente los responsables del deterioro de las fibras. De menor forma, los tratamientos biológicos, que conlleven largos periodos de exposición, deterioran no solo la matriz vegetal si no también la hemicelulosa, misma que une a las fibrillas que afectan de igual manera al ángulo fibrilar y la celulosa. Estas características son las que aportan las propiedades de interés a nuestras fibras de refuerzo. Por otro lado, los tratamientos mecánicos excedidos en fuerza también afectan a las propiedades de las fibras. A continuación, en la **Figura 13**, se muestra una gráfica en función de las propiedades mecánicas de las fibras y el tiempo de exposición de las fibras para su extracción.

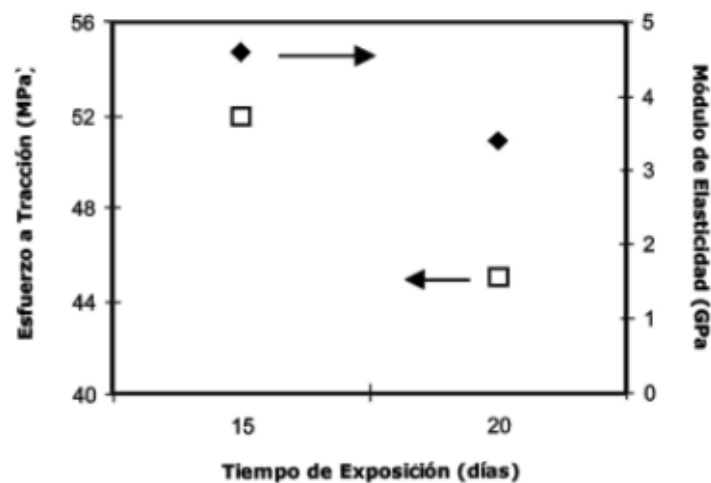


Figura 13, Comportamiento mecánico de fibras de banana extraídas, obtenidas en distintos periodos de tiempo de extracción.

Fuente: Gañán et al., (2003)

En la extracción, además se busca coincidir con los conceptos de sostenibilidad, en los cuales se busca la incorporación de las fibras naturales como sistema refuerzo.

Los procesos de extracción con uso reducido o casi nulo de agua aumentan significativamente la sostenibilidad de la producción de fibras naturales en lugares y entornos en donde el agua también es un bien escaso. (Bezazi et al., 2014)

3.1.2 Técnicas para recubrimiento y curado de fibras de refuerzo

En la implementación de las fibras naturales vegetales como refuerzo en la matriz, se debe analizar la interacción entre fibra y matriz. Por este motivo, comúnmente se realizan modificaciones en las propiedades de la matriz para evitar el daño de las fibras.

Para el tratamiento de las fibras existen métodos de recubrimiento como la impregnación de fibras con silicato de sodio (Na_2SiO_3), o sulfato de magnesio ($MgSO_4$), que se mencionan en los estudios de (Olivito et al.,2014; Torgal & Jalali, 2011). El recubrimiento con aceites de linaza simple, aceite de linaza con catalizador, parafina y cera de abejas también son utilizados para evitar la degradación de las fibras (Merta & Tschegg, 2012). Además, se presentan recubrimientos de las fibras con resinas de diferentes características, como lo mencionan en sus estudios (Ahmad & Fan, 2017; Mercedes et al.,2018).

Ahmad & Fan, (2017) realizaron un recubrimiento de las fibras con resinas, y se procedió a mezclar las resinas durante aproximadamente 10 minutos para eliminar el aire de la mezcla. Se colocó la resina de manera uniforme sobre la fibra previamente tensionada y a torsión. La resina se colocó aproximadamente durante 2 minutos para su posterior secado durante 24 horas a 22°C y con una humedad relativa del 50%.

El otro tipo de tratamiento para las fibras es el curado que trata de adhesión por sumersión de las fibras en los materiales de recubrimiento. La única diferencia es su aplicación en las fibras, formando un revestimiento en los dos casos. Según Torgal & Jalali (2011) se realiza una sumersión para revestimiento en MPTS (3- metacriloxipropiltrimetoxisilano), obteniendo fibras libres de productos de hidratación. También se menciona el tratamiento con APTS (3-aminopropiltriethoxisilano) que produce una mineralización acelerada.

3.1.3 Proceso de elaboración del mortero como matriz

Para la elaboración de la matriz del material compuesto cementicio, se debe tomar en cuenta que la protección al tejido de fibra vegetal. Existen dos métodos de protección basados en la variación de las propiedades del mortero como de las fibras.

En la variación del mortero para proteger a las fibras de los ataques químicos del cemento, generalmente se opta por realizar una dosificación adecuada para mortero, donde se busca reducir la alcalinidad del cemento. Se podría conseguir esto añadiendo productos puzolánicos y escorias de alto horno, como lo mencionan (Olivito et al.,2014; Torgal & Jalali, 2011). En el estudio de (Ahmad & Fan, 2017) se prepara un mortero con una dosificación de relación 1:15 cemento-arena y una proporción agua cemento de 0.4, con arena secada al horno

a 100°C durante 24 horas antes de la mezcla, y cemento portland con caliza (CEM II) equivalente a un cemento hidráulico compuesto, según (PCA, 2016).

3.1.4 Procesos y técnicas utilizados en la elaboración de FRCM con tejidos naturales.

Para la elaboración de los compuestos FRCM reforzados con tejidos naturales, se inicia con el tratamiento de las fibras, puesto que como se ha mencionado previamente varios autores justifican la protección de las fibras para evitar un envejecimiento acelerado y mejorando la interacción mecánica de los componentes, más aún en el caso de mallas de fibras vegetales, como lo menciona Mercedes et al., (2018).

Para el tratamiento de las fibras se procede a colocar con un pincel o una brocha pequeña la resina sobre las mallas de refuerzo o sobre las fibras sin tejer aún. El tejido de las fibras comúnmente se realiza sobre un telar mediante un tejido de punto por trama. La cantidad de resina está en función del espesor y del porcentaje de absorción de las fibras. Se ha estudiado que aproximadamente se necesita 6g de resina por cada 60cm de longitud de cuerda trenzada, en el caso de una fibra de sisal. Para el diseño geométrico del tejido de las mallas se tiene como referencia a las mallas comerciales del mercado para refuerzo de compuestos FRCM, aumentando el espesor en comparación con las fibras sintéticas. En caso de formar los tejidos manualmente, el telar manual es un soporte de madera de 200 x 600mm, utilizando clavos como anclajes cada 12mm en dirección de la urdimbre y cada 25mm en dirección de la trama. En el caso de tejidos de distintos tipos de fibras, el número de hilos que conforman los mechones para anclar y tejer es distinto, debido a sus propiedades. En la investigación experimental de Mercedes et al., (2018) se muestran diferentes tipos de tejidos con fibras de sisal, algodón, lino y cáñamo, como se observa en la **Figura 14**.

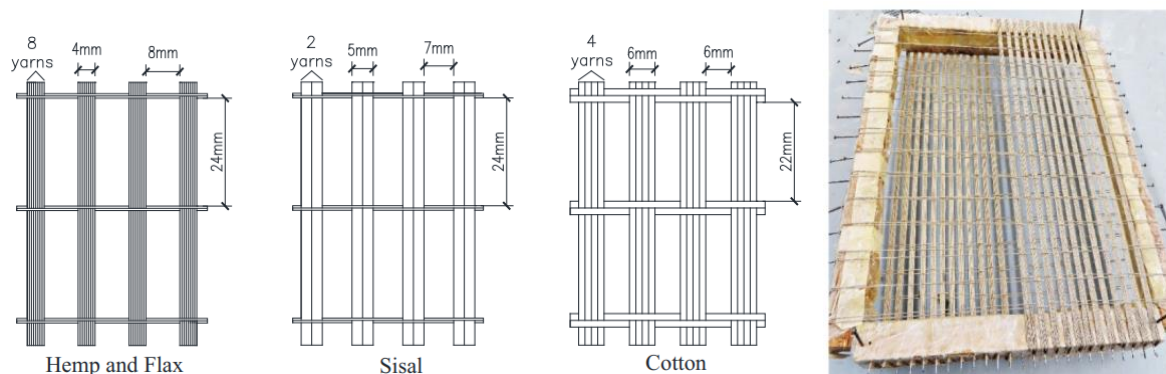


Figura 14, *Diseño y fabricación de mallas de fibra natural vegetal.*

Fuente: Mercedes et al., (2018)

Para continuar con la elaboración de las probetas, se procede con la colocación del mortero en el molde, y se debe tratar de dejar los tejidos de refuerzo en el medio de la matriz,

es decir, luego de la primera capa. Se debe penetrar la malla ligeramente y luego colocar la segunda capa de mortero del mismo espesor de la primera, consiguiendo el espesor total deseado, para finalmente realizar el curado del compuesto durante 7 días. (Ahmad & Fan, 2017)

3.1.5 Técnicas utilizadas para la colocación de los compuestos NFRCM como refuerzo en elementos de hormigón armado.

En las investigaciones revisadas en esta recopilación, se puede notar que los compuestos NFRCM (matriz cementicia reforzada con tejidos de fibras naturales) aún no cuentan con suficientes estudios en el ámbito de la aplicación de estos compuestos como refuerzo en elementos estructurales de hormigón armado, pero se puede apreciar la similitud en la colocación que tendría en comparación con otros compuestos FRCM de fibras sintéticas, ya que la única variación serían las propiedades mecánicas del tipo de fibra. El proceso de colocación o reforzamiento de los elementos estructurales con los compuestos es muy similar.

Existen básicamente dos tipos de aplicación de los compuestos FRCM para reforzar los elementos estructurales. El primero y más común es el encamisado, que consiste en la aplicación del compuesto sobre el elemento a reforzar mediante un empaste de matriz que contendrá al tejido de refuerzo. El tejido en algunos casos puede ser envuelto y en otros colocado por láminas. El segundo método utilizado es el de los sistemas de encofrado tipo SiP, que se trata de un armado del encofrado con las características de un compuesto de refuerzo. Este elemento servirá como un encofrado regular, con la diferencia que aportará sus propiedades al elemento, ya que son encofrados fijos.

3.1.5.1 Sistema de encamisado.

Varias investigaciones experimentales, como las propuestas por (Bournas et al., 2007; Triantafillou et al., 2006; Triantafillou & Papanicolaou, 2006), coinciden en la aplicación de los compuestos mediante el encamisado. Se procede a colocar el mortero en capas pequeñas, en el caso de Bournas, (2007), se realizó la colocación de una capa de mortero de aproximadamente 2 mm (0,08 in.) de espesor, con una liana metálica lisa. Luego de la colocación de la primera capa de mortero sobre la superficie de hormigón previamente humedecida, se aplicó el tejido de de carbono y de vidrio que fueron los más utilizados en estas investigaciones, para finalmente presionar ligeramente en el mortero, hasta que el mortero sobresalga levemente por los espacios del tejido. Posteriormente se coloca la segunda capa de mortero, recubriendo completamente el tejido. Este proceso se puede observar en la **Figura 15**. En caso de requerir de capas de refuerzo adicional se repite la operación, tomando en cuenta que entre cada capa se debe colocar un 1mm de mortero para ayudar a la interacción entre el refuerzo y la matriz.



Figura 15, Colocación del encamisado de compuestos FRCM.

Fuente: Bournas et al., (2007)

En la investigación de Triantafillou et al., (2006), se realiza una envoltura del tejido de polipropileno y carbono con anclajes en los extremos y se tiene un proceso de colocación similar al del estudio realizado por Triantafillou & Papanicolaou, (2006), en donde se compara un encamisado normal, con un encamisado en espiral, guardando 10° de inclinación con respecto al eje transversal del elemento a reforzar, como se aprecia en la **Figura 16**.

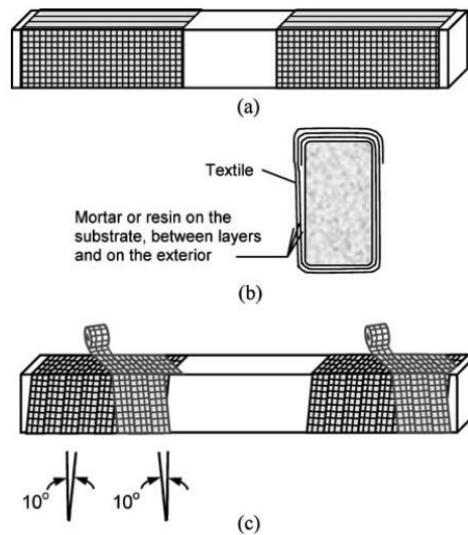


Figura 16, Encamisado en placas y en espiral de compuestos FRCM.

Fuente: Triantafillou & Papanicolaou, (2006)

3.1.5.2 Sistema TRC-SiP.

Los elementos de encofrado tipo SiP (Stay in Place), son elementos permanentes o integrados al elemento estructural que se va a construir. Estos encofrados presentan las ventajas de los elementos prefabricados debido al tipo de acabado que se puede llegar a dar principalmente. Dentro de los SiP existe una clasificación que son los encofrados participantes

y los no participantes, su diferencia básicamente se enfoca en si contribuyen o no a la resistencia del elemento que van a contener. Se han desarrollado diversos tipos de sistemas SiP, como lo menciona Papanicolaou & Papantoniou, (2009) en su investigación. En la actualidad existen SiP de varios materiales y los reforzados con fibras, estos últimos se basan en la aplicación de elementos de hormigón colocados contra encofrados TRC-SiP de paredes delgadas.

La producción de estos sistemas para vigas según Papanicolaou & Papantoniou, (2009) comienza con la aplicación de dos capas de mortero de 6 mm de espesor, dentro de ellas se coloca el refuerzo textil según las capas requeridas. En caso de colocar más de una capa de tejido de refuerzo, se debe colocar una capa de 1mm de espesor de mortero entre los tejidos para separar los textiles y mejorar el anclaje.

En la mayoría de los especímenes, la superficie expuesta del elemento TRC se hace rugosa, este proceso se realiza mientras está en estado fresco, formando ranuras longitudinales, utilizando una herramienta manual. Después de un período de curado de 24 horas, se coloca el refuerzo y se vierte sobre el TRC el material para la construcción del elemento estructural de hormigón armado. A continuación, en la **Figura 17**, se muestra la elaboración del encofrado TRC-SiP para vigas.

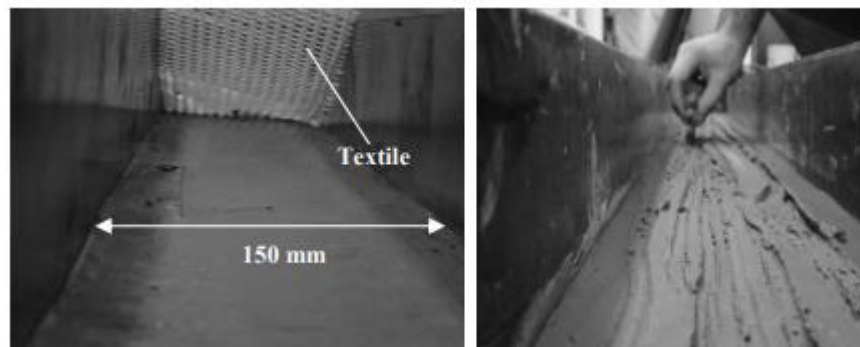


Figura 17, Sistema TRC-SiP para vigas.
Fuente: TRC Papanicolaou & Papantoniou, (2009)

Para los elementos de encofrado tipo columna Papanicolaou & Papantoniou, (2009) proponen colocar en un molde metálico modular hecho a medida con cuatro placas de acero con un espacio de 12 mm, en el que se bombeara manualmente el mortero a base de cemento a través de un tapón en la parte inferior del molde. Los bordes de las placas deben ser chaflanadas en un radio de curvatura de 15 mm. Antes de unir las placas se debe colocar el tejido en una sola capa en el medio del espacio entre las partes interior y exterior del molde, como se muestra en la **Figura 18**.

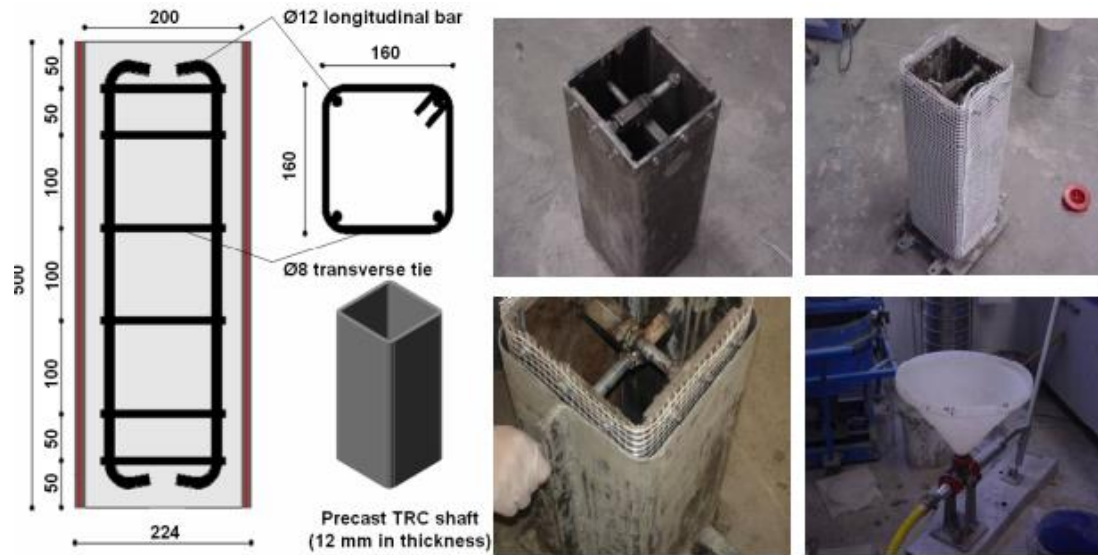


Figura 18, Sistema TRC-SiP para columnas.
Fuente: TRC Papanicolaou & Papantoniou, (2009)

3.1.6 Método analítico para la predicción del comportamiento en la interfase FRCM-elemento de hormigón.

El comportamiento en esta interfase es de gran importancia, ya que es el que marcará la diferencia en el desenvolvimiento del compuesto, reforzando los elementos de concreto. Los resultados obtenidos de los compuestos FRCM y NFRCM analizados por separado en sus diferentes etapas, toman mayor protagonismo según el tipo de falla que se puede predecir. Estas fallas se presentarán en la interfase de unión del compuesto de refuerzo y el elemento RC.

3.1.6.1 Problema Modo II.

Para el análisis de las fallas de adherencia, se menciona que generalmente se asume una condición de mecánica de fractura modo II. Este modo hace referencia al desprendimiento del compuesto a lo largo de las interfases que se mencionaron anteriormente; esto debido a esfuerzos cortantes " σ_v ". El problema modo II se enfoca en la Ley del Material Cohesivo (CML) que es la relación entre la tensión de corte y desplazamiento relativo, la suposición clave de la ley CML es que la interfaz se reduce ficticiamente a una capa de material de espesor cero, cuyas propiedades están definidas por la propia ley CML.

DATOS

- CML → (Para determinar interfaz)

RESULTADOS

- Inicio de la grieta.
- Propagación de la grieta.

Para la resolución analítica y predicción del comportamiento en la interfase, necesitaremos de la ley CML. Conociendo que el área bajo la curva de la CML es igual a la energía de fractura " G_F ", se procede con la metodología de cálculo, donde:

" G_F " \longrightarrow Está relacionado con la carga de desprendimiento "DL".

"DL" \longrightarrow Fuerza máxima que se puede transferir en la interfaz antes del inicio de la propagación de la grieta. Podría considerarse también como el término equivalente a "BC".

"BC" \longrightarrow Capacidad de union, término utilizado en juntas de sutrato FRP.

"DL" \longrightarrow " P_{deb} " \longrightarrow Este término se utiliza para resaltar que es la carga correspondiente al inicio de la propagación de la grieta, pero no necesariamente la carga máxima transferida en la interfase FRCM-Elemento de concreto.

" τ_f " \longrightarrow Tensión asociada con cualquier deslizamiento "SF".

" l_{eff} " \longrightarrow Longitud efectiva; Longitud mínima de unión para alcanza "DL" o " P_{deb} " despreciando el efecto de fricción asociado al mecanismo de transferencia de tensiones interfaciales.

Este valor se calcula a partir de la ley CML. Se deriva una fórmula de forma cerrada, si la función CML tiene ciertas características matemáticas. De manera contraria se evalúa numéricamente, la descripción detallada de estos procesos y la obtención de estos valores se encuentran en las investigaciones de Focacci & Carloni, (2015) y Carloni & Focacci, (2015).

Para la obtención de la función de la ley CML se detallan métodos distintos. El método directo se puede obtener a partir de pruebas de laboratorio; sin embargo, son métodos complejos, que se basan en la medición de la deformación longitudinal en la longitud adherida. En caso de existir deslizamiento de las fibras dentro de la matriz, se debe medir las deformaciones de las fibras. Si la fisura interfacial ocurra en la interfase matriz-FRCM la deformación a medir debe estar dentro de la matriz, lo más cercano posible al elemento de concreto, lo cual requiere métodos más complejos aún.

El método indirecto para la obtención de la función de la ley CML, se basa en los ensayos de cizallamiento. Se deben asumir algunas funciones CML basándose en la experiencia de los investigadores, para posteriormente calibrar en contraste con los datos experimentales. La principal ventaja del método indirecto, es que no requiere equipo complicado para la medición de las deformaciones a lo largo del área de unión, los datos experimentales requeridos son los valores de carga máxima para probetas con diferentes longitudes de unión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibras naturales

4.1.1 Materias primas utilizadas en la producción de materiales compuestos FRCM/TRM reforzados con tejidos de fibras naturales.

Los compuestos FRCM/TRM presentan diversos materiales en sus fases. Dentro de la fase primaria o matriz, la materia prima a analizar son los componentes del mortero mientras que, en la fase secundaria o refuerzo, se estudiará las fibras vegetales, y por último se revisará la interfase entre la matriz y el refuerzo, en caso de requerir una unión interfacial mejorada con algún ingrediente externo al compuesto.

El mortero que se prepara como matriz del material compuesto, generalmente es un mortero regular, como se menciona en los estudios de (Ahmad & Fan, 2017; Mercedes et al., 2018). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que, en dichos estudios, las fibras son tratadas previamente con un recubrimiento, lo cual la protege de los ataques químicos comunes del cemento. Los tipos de cementos utilizados deben contar con una alcalinidad baja, conociendo que los aluminosilicatos son los activadores alcalinos. En las fichas técnicas de los proveedores del cemento como materia prima, se debe buscar la mejor opción según el caso, o dosificar propiamente elementos aglutinantes que cumplan las especificaciones requeridas según normativas específicas para ser una matriz cementosa, como es el caso del estudio de (Olivito et al., 2013), quienes utilizan una matriz hidráulica de cal, que cumple con los requisitos para mortero de uso en estructuras de mampostería. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las reacciones puzolánicas necesitan principalmente de la sílice, la alúmina y el óxido férrico para poder reaccionar, por lo cual se busca un equilibrio adecuado del material.

Las fibras de refuerzo utilizadas comúnmente, son fibras de polietileno, polipropileno, vidrio AR y aramida. Sin embargo, en los últimos años, las investigaciones se han enfocado en buscar materiales que nos brinden las mismas o mejores características mecánicas, pero que representen un menor impacto ambiental y una sostenibilidad adecuada. Es por eso que se despierta el interés en el estudio de fibras naturales como refuerzo de las matrices cementicias.

Si bien en la actualidad no existen suficientes estudios sobre fibras de origen natural en FRCM y TRM para usos o aplicaciones en estructuras de hormigón armado, las pocas investigaciones motivan a una mayor utilización de las fibras naturales, por su bajo costo y baja densidad principalmente, sin olvidar que provienen de recursos renovables, que su producción tiene un bajo impacto ambiental y que su manipulación en compuestos es mucho menos riesgosa al interactuar con un matriz cementicia.

Existen diversos estudios del comportamiento de fibras naturales dentro de una matriz de cemento, como los presentados por (Torgal & Jalali, 2011; Merta & Tschegg, 2012), quienes

principalmente estudian las interacciones de las fibras vegetales con la matriz y sus características.

Para una comprensión adecuada de la interacción de agentes externos con las fibras vegetales, se debe entender de forma clara la estructura de las fibras vegetales. Las fibras presentan sus propiedades mecánicas directamente de las paredes celulares que las conforman, es decir que todos los ataques y la protección química sucede ahí.

En la pared celular se puede identificar la pared primaria, la pared secundaria, la lámina media y el lumen. Tanto la pared primaria como la secundaria guardan características similares, siendo la celulosa el componente dominante, y cada una de ellas provee la mayor parte de las características a las fibras. Estas paredes tienen distinto ángulo microfibrilar, siendo la pared secundaria la predominante por tener un tamaño mayor. En las dos paredes se concentra la celulosa formando cadenas de celulosa, mismas que dan origen a las microfibrillas celulósicas. Estas microfibrillas están unidas mediante la micela o mela intercelular.

La micela reacciona al igual que la celulosa con agentes externos, lo cual hace que las propiedades originales de las fibras varíen tanto positiva como negativamente, dependiendo el caso. Debemos tener en cuenta que la micela está formada por hemicelulosa, pectina y lignina. La unión de estos compuestos da como resultado las macrofibrillas de la celulosa y el espacio interfibrilar. La lamina media se encuentra en la unión de las paredes primarias, conformada por proteínas y pectinas, mientras que el lumen son canales de comunicación existentes para compartir sustancias entre las células mediante los plasmodermos, los plasmodermos desembocan en las punteaduras, esta parte de la pared celular vegetal es la que da permeabilidad a las células, mismas que reaccionan en contacto con otro agente, en ocasiones permiten mejor absorción de recubrimiento lo cual le da mejores características mecánicas y en otras ocasiones permite la absorción de agua, provocando hinchazón.

Las propiedades de las fibras naturales vegetales son anisotrópicas por su conformación, por lo cual su implementación como refuerzo debe realizarse en función a los esfuerzos que se quieren contrastar. Existen propiedades en las fibras vegetales que son clave para el estudio de las mismas como refuerzo, tales como: el ángulo microfibrilar (MFA) y el índice de polimerización (DP) de la celulosa. Estas dos propiedades son de gran importancia ya que dan características mecánicas distintas a las fibras.

El “ángulo microfibrilar” dicta las propiedades anisotrópicas de las fibras, ya que es la que nos muestra la dirección en la que se encuentran las fibrillas celulósicas en las paredes primaria y secundaria. Por otro lado, tenemos al “DP de la celulosa” que es el índice de polimerización o grado de polimerización, factor que muestra la cantidad de celulosa y cristalinidad de las fibras.

Según el estudio realizado por Djafari, (2017), se menciona que, mientras la cantidad de celulosa sea mayor al ángulo microfibrilar (MFA), la fibra presenta mayor resistencia a tracción y en el caso contrario será mayor la ductilidad de la fibra.

Las fibras naturales vegetales presentan ciertas ventajas y desventajas al estar inmersas en una matriz de cemento, varios autores (Djafari,2017; Torgal & Jalali, 2011; Merta & Tschegg, 2012) coinciden en que las fibras aportan con una reducción de la contracción plástica de la matriz, además de mejorar la capacidad de absorción de energía. Por otra parte, mencionan que existe una variación de las propiedades, pues las fibras principalmente sufren una degradación al estar en contacto con un ambiente alcalino, ya que este disuelve la lignina y la hemicelulosa.

Torgal & Jalali, (2011) en su estudio mencionan que el ambiente adecuado para que se conserven las fibras debe tener un PH de 9 o menor. Por otra parte, las fibras absorben el agua de la matriz por su estructura celular, específicamente por los plasmodermos, que le dan permeabilidad a las células, lo cual produce una hinchazón en las fibras.

La cristalinidad de las fibras es otro fenómeno producido por la temperatura generada en la matriz, puesto que esto genera una descomposición térmica de las fibras. Otro problema que se presenta en las fibras es su poca adhesión interfacial con la matriz, a lo que varios autores recomiendan usar un tratamiento previo en la fibra.

Se ha demostrado que el enlace interfacial ha mejorado significativamente con el recubrimiento, debido a los grupos hidroxilos que poseen las fibras epoxi, ya que estos generan mayor cantidad de enlaces de hidrogeno y reduce la absorción del agua. Estas cantidades de enlaces varían según el tipo de fibra que estemos utilizando.

Se ha observado además la reducción de los poros abiertos entre la fibra y la matriz, dándole más permeabilidad al compuesto, ayudando a disminuir el movimiento del agua de la fibra y la matriz, asegurando un menor deterioro de la región de transición interfacial a medida que se fragua el cemento, como lo menciona Ahmad & Fan, (2017) en su estudio de los compuestos FRCM con tejidos vegetales. En el caso específico de las fibras de sisal con recubrimiento de resina epoxi, se puede percibir la formación de una estructura más compacta.

Las imágenes OM & SEM, con sus diferentes comportamientos según el recubrimiento, se pueden apreciar en la **Figura 19**.

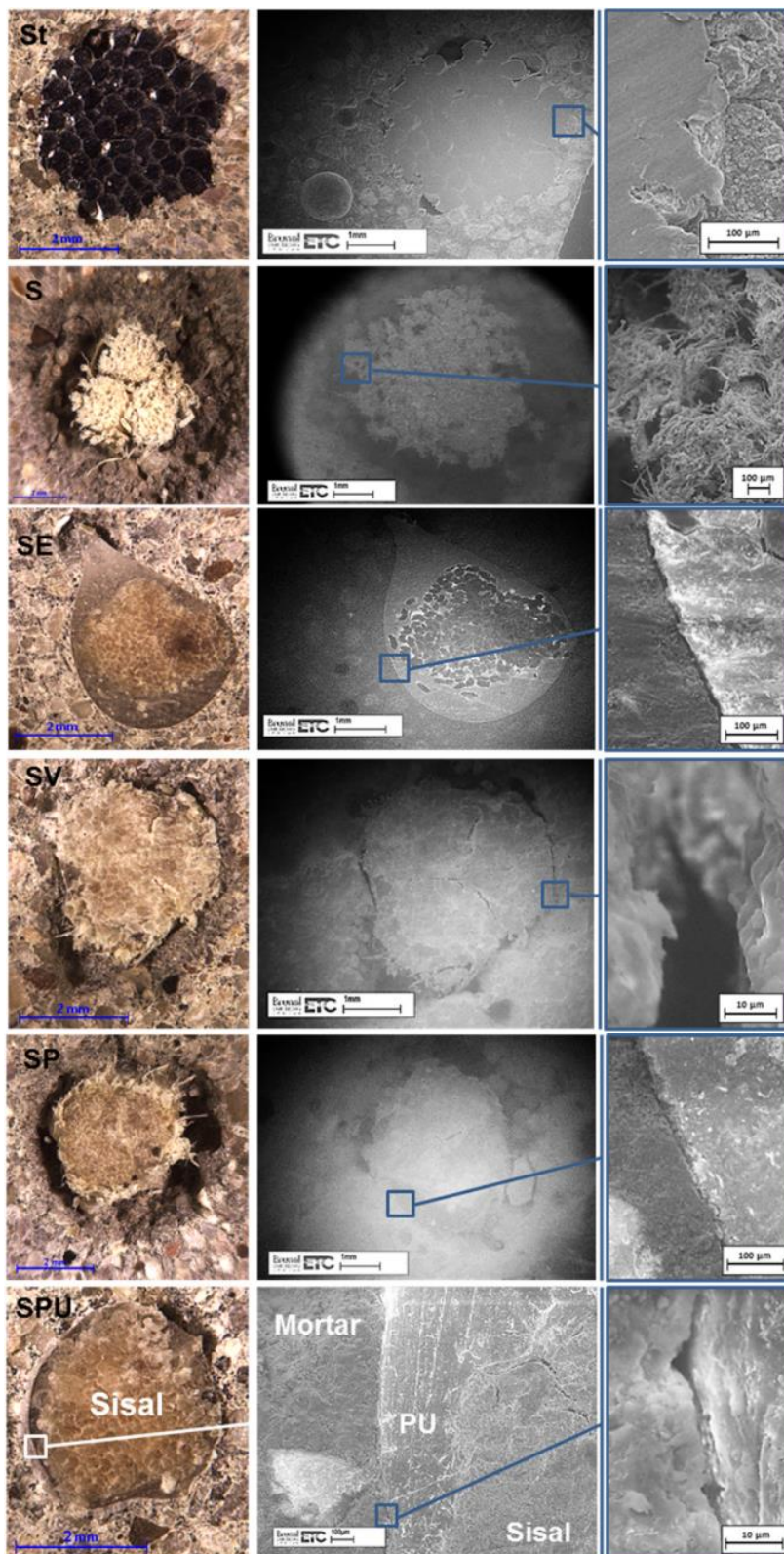


Figura 19, Imágenes OM & SEM de los compuestos FRCM; St=Fibra de acero; S=Fibra natural de sisal;
 SE=Revestimiento epoxi S; SV=Revestimiento de vinylester S; SP=Revestimiento de polyester S;
 SPU=Revestimiento de polyuretano S

Fuente: Ahmad & Fan, (2017)

4.1.2 Propiedades físicas y mecánicas de los compuestos FRCC reforzados con tejidos de fibras naturales.

En las investigaciones de la interacción de las fibras naturales en un sustrato de cemento, cada trabajo reporta características diferentes, tanto en los testigos como en las fibras. En algunos estudios los testigos son placas, cilindros y en casos específicos el propio material compuesto FRCC. Todos estos estudios nos ayudan en la caracterización de las propiedades de estos compuestos.

Los estudios de (Barilli et al., 2018; Merta & Tschegg, 2012; Torgal & Jalali, 2011;) nos muestran el comportamiento de las fibras naturales vegetales dentro de una matriz de cemento, pero, en este caso, para el estudio de las interacciones las colocan como fibras dispersas de diferentes longitudes; sin embargo, esto es de gran ayuda para la comprensión de los ataques químicos a las fibras y de cómo estas interactúan en la matriz.

La evolución de los compuestos FRCC y su importancia son tratados en la investigación de Ascione et al., (2018). Por otro lado, existen estudios particulares de compuestos FRCC reforzados con tejidos naturales vegetales como los propuestos por (Ahmad & Fan, 2017; Barilli et al., 2018; Mercedes et al., 2018; Onuaguluchi & Banthia, 2016) donde se estudian sus propiedades mecánicas con diferentes tipos de fibras vegetales.

De igual forma Mercedes et al., (2019) presenta otra investigación, en la cual propone un modelo numérico capaz de reproducir el comportamiento experimental y analítico de los compuestos FRCC con fibra vegetal. Focacci et al., (2017) en su estudio nos muestra la interacción en las juntas de los compuestos FRCC con sustratos de hormigón mediante un método indirecto de calibración para la ley del material cohesivo interfacial, discutido en la **sección 4.1.6** para juntas de hormigón. Para una mejor comprensión analítica de los cálculos realizados en este estudio se revisan estudios previos del mismo autor (Focacci & Carloni, (2015) y Carloni & Focacci, (2015), en donde si bien son estudios enfocados en la interacción de las juntas de los compuestos con mamposterías, los cálculos realizados para la ley de material cohesivo son aplicados en el caso de sustratos de hormigón de igual manera.

Basados en estos estudios principalmente, a más de otros estudios se puede realizar una caracterización adecuada de las propiedades de los compuestos FRCC reforzados con tejidos de fibras naturales.

4.1.2.1 Resistencia a tracción de compuestos NFRCC.

Los compuestos FRCC reforzados con tejidos de fibras presentan distintas propiedades, dependiendo no solo del tipo de tejido si no del revestimiento de las fibras. En los estudios revisados en este trabajo se han encontrado resultados analíticos, experimentales y de modelos numéricos mediante software de análisis estructural, que nos permite realizar contrastes entre los resultados.

4.1.2.1.1 Resistencia a tracción respecto al área transversal del compuesto.

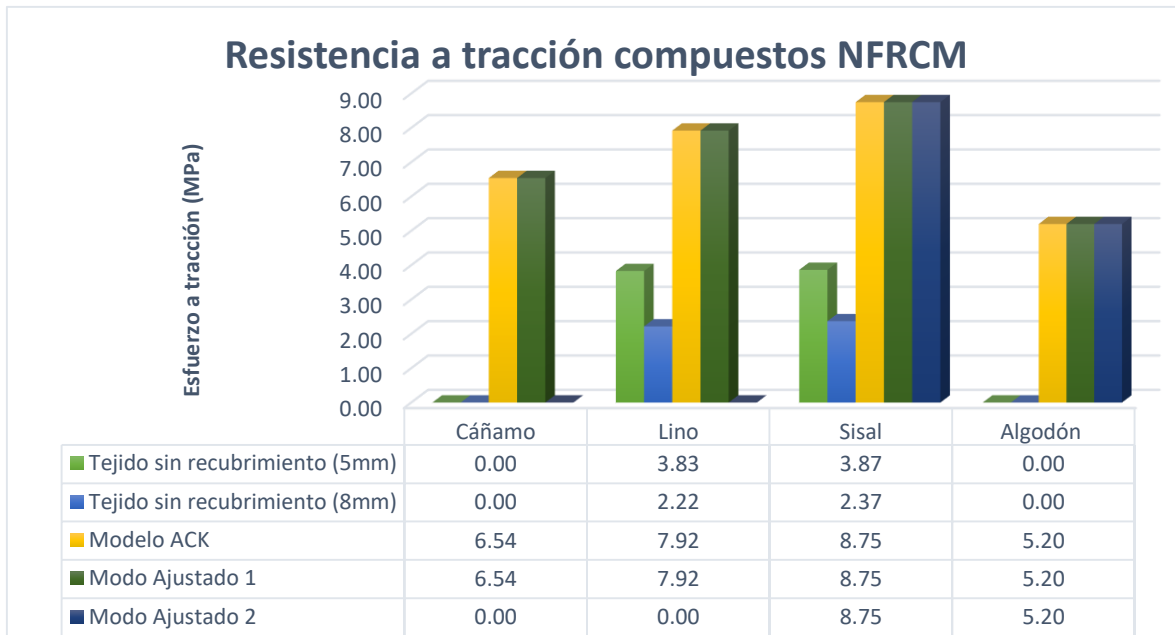


Figura 20, Resultados resistencia a tracción respecto al área transversal del compuesto.

Fuente: Benítez W.

Los resultados presentados en la **Figura 20.** de esta revisión bibliográfica, pertenecen a la resistencia a tracción de dos estudios, donde se realizó diferentes análisis. En el caso de los dos primeros resultados se trata de una investigación experimental realizada por Olivito et al., (2014) donde encuentran las propiedades de los compuestos NFRCM con una variación en el espesor del compuesto, mientras en el segundo caso se trata de una investigación con resultados analíticos basados en el modelo ACK (modelo trilineal de esfuerzo deformación) y dos modelos ajustados adicionales para poder refinar los resultados. Esta investigación fue realizada por Mercedes et al., (2018).

Se puede apreciar, en el caso de los compuestos reforzados con fibras de lino y sisal, que son las mismas fibras analizadas los dos autores, además, que los valores de las resistencias experimentales son mucho menores a los resultados analíticos obtenidos. Sin embargo, se debe mencionar que en el caso de la investigación donde se presenta los resultados analíticos (Modelo ACK. Modelo ajustado1 y 2), los valores utilizados para obtener la tracción del compuesto son de tejidos de fibras recubiertas con resinas, las cuales mejoran las propiedades de las fibras influyendo directamente en el comportamiento del compuesto.

En los resultados experimentales se puede apreciar que el compuesto que tiene un mejor comportamiento a tracción es el reforzado con fibras de sisal, con poca diferencia respecto a los compuestos con fibras de lino, se aprecia además la influencia del espesor del compuesto, ya

que los compuestos de mayor espesor presentan resistencias menores, guardando la relación de superioridad de la fibra de sisal frente a las de lino.

Los modelos analíticos también corroboran la superioridad a tracción de los compuestos reforzados con fibras de sisal respecto a las de lino, con una diferencia no tan ligera como en los resultados experimentales, pero sin ser valores exagerados, después de estas dos fibras se encuentran los refuerzos de cáñamo y por último los tejidos de algodón.

4.1.2.1.2 Resistencia a tracción respecto al área transversal del tejido.

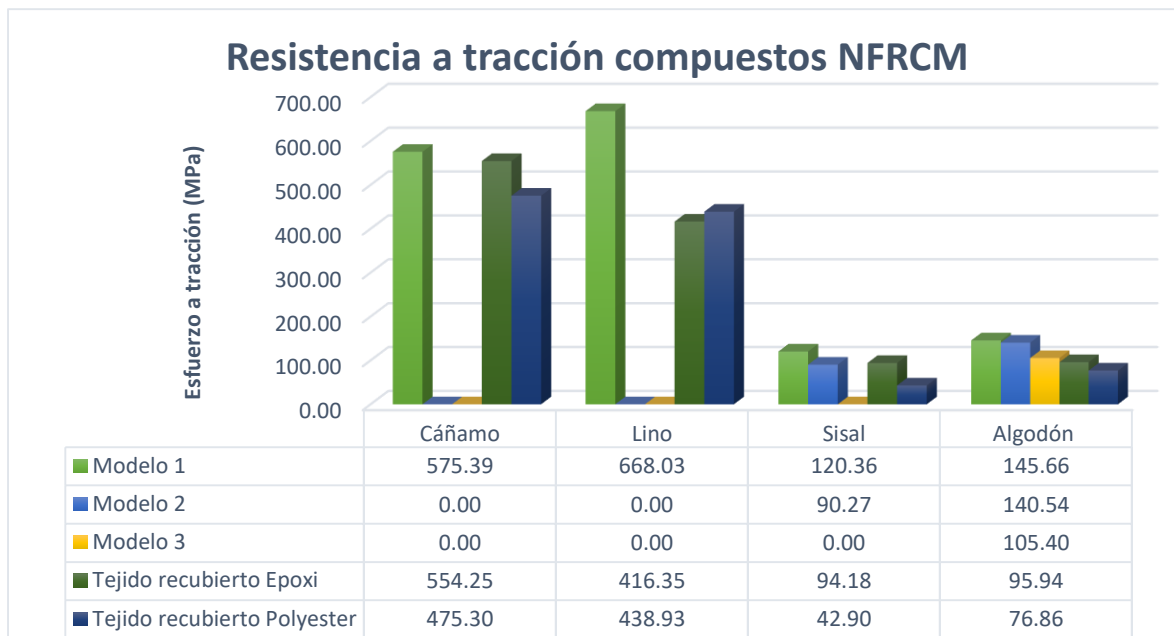


Figura 21, Resultados resistencia a tracción respecto al área transversal del tejido.

Fuente: Benítez W.

Si tomamos en cuenta la teoría del modelo ACK planteado por Aveston et al., (1971) y ampliado posteriormente por Aveston & Kelly, (1973) para el comportamiento a tracción de compuestos cementicios, es adecuado analizar la resistencia ultima a tracción en función del área transversal del tejido, como se aprecia en la **Figura 21.**, ya que se menciona que en esa fase trabaja el tejido de fibra por separado de la matriz a diferencia del esfuerzo a tracción antes de la primera fisura, que sería la primera fase del modelo ACK. Es por eso que también se analiza la resistencia a tracción de los compuestos NFRCM de esta manera. A continuación, se analizan y comparan los resultados de dos estudios diferentes realizados por; Mercedes et al., (2018) y Mercedes et al., (2019), en los cuales se obtienen resultados experimentales, en el primer estudio, y de modelos numéricos computacionales, en el segundo estudio. Las fibras analizadas son las mismas del apartado anterior, que son las más comunes dentro de este tipo de compuestos.

En los resultados obtenidos en estos estudios se puede observar que la superioridad de los compuestos reforzados con tejidos de sisal no se presenta siendo los compuestos con refuerzo de fibras de lino los de mejor comportamiento a tracción. Estos resultados se pueden presentar según Mercedes et al., (2019) por la capacidad del tejido de lino para adherirse con la matriz de cemento, pese a su recubrimiento previo con resinas.

Los compuestos reforzados con tejidos de cáñamo son los que tienen menos variación en los resultados presentados en las dos investigaciones y que mejor comportamiento a tracción presentan, lo cual es de gran ayuda, ya que nos serviría para predecir el comportamiento de estos compuestos con más certeza mediante un software.

Se puede apreciar, además, que existe una variación en los resultados dependiendo del tipo de recubrimiento utilizado, además del tipo de fibra, debido a la interacción entre estas dos fases, lo cual nos da un aviso del tipo de resina más adecuado según el tipo de fibra al cual vamos a recubrir. Esto se debe a la naturaleza de las fibras y de su interacción con el recubrimiento. La mayoría de tejidos presentan un mejor comportamiento a tracción con el recubrimiento de resina epoxi, pero se debe tomar en cuenta el comportamiento de las fibras con otro tipo de recubrimiento, en caso de buscar reforzar otros tipos de solicitaciones de esfuerzos externos.

4.1.2.2 Módulo de elasticidad en la primera fase de compuestos NFRCM.

A continuación, se presentan 10 pruebas diferentes realizadas en distintos estudios para la obtención del módulo de Young de cuatro tipos de refuerzos en los compuestos NFRCM, en algunos casos coinciden hasta un máximo de 8 pruebas con la misma fibra de refuerzo, siendo los compuestos reforzados con sisal los más estudiados. Estos resultados se obtuvieron de tres investigaciones, donde se presentan valores obtenidos de forma experimental, analítica y computacional mediante modelos numéricos propuestos. La mayor variación de los resultados, al igual que en el apartado anterior, se presentan en el caso de los tejidos de refuerzo que no fueron recubiertos previamente, mientras en el caso de los módulos de elasticidad también interviene el desprendimiento de las fibras con la matriz y su interacción en las distintas etapas. La **Figura 22.** presenta estos valores de forma gráfica para su mayor comprensión.

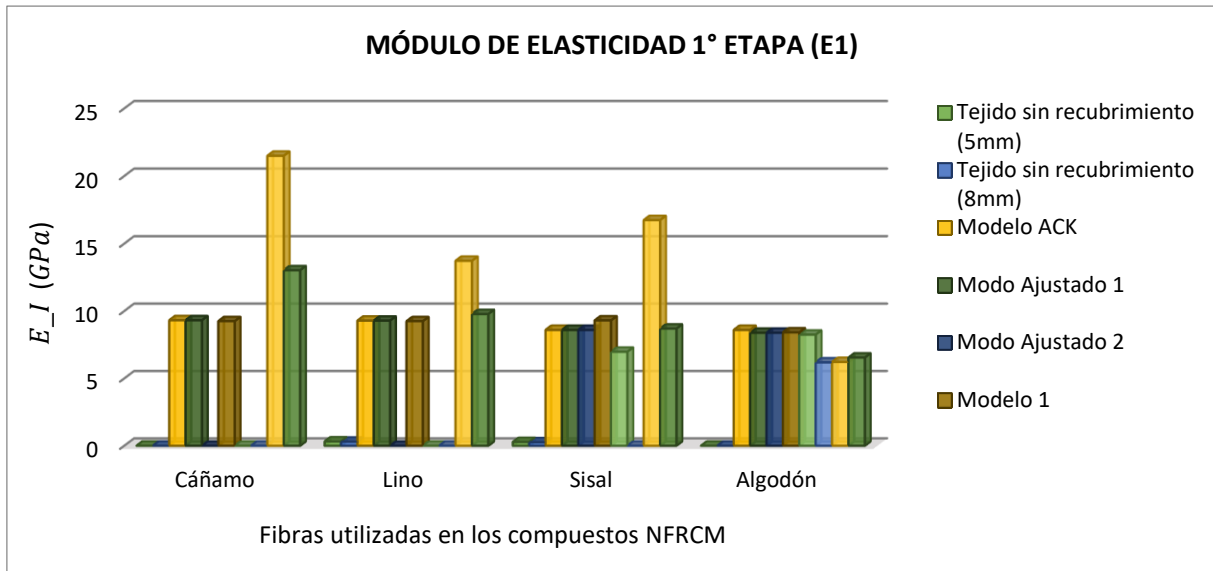


Figura 22, Resultados del módulo de elasticidad de compuestos NFRCM.

Fuente: Benítez W.

En el caso del módulo de elasticidad en la primera fase E-I, se puede notar que existe una diferencia considerable entre los diferentes estudios. En los últimos dos casos que hacen referencia al tipo de recubrimiento, se puede notar que el recubrimiento con resina epoxi en los tres primeros tejidos mejora el módulo de elasticidad de los compuestos NFRCM, a excepción del caso de los tejidos de fibra de algodón, donde la resina polyester es la que mejora sus valores, al igual que en el caso anterior a tracción. Esto se debe a la interacción entre las resinas y los tipos de fibras. En general los resultados obtenidos son muy similares en todos los casos de estudio en esta primera fase del módulo de elasticidad que es obtenido hasta llegar a la primera fisura del compuesto NFRCM.

4.1.2.3 Módulo de elasticidad en la tercera fase de compuestos NFRCM.

El modelo trilineal ACK se enfoca en la interacción que se produce en la interfase tejido de refuerzo y matriz. Es por eso que se busca una mejor comprensión y análisis en los ensayos esfuerzo deformación. Este modelo menciona que en la tercera fase o etapa se produce la estabilización de las fisuras y todas las tensiones son soportadas por las mallas de refuerzo de los compuestos; razón por la que se debe prestar atención a los valores obtenidos en esta fase del módulo de elasticidad. En esta etapa la mayoría de pruebas toman en cuenta el área transversal total del tejido de refuerzo sin la matriz, por lo mencionado anteriormente en el caso de las investigaciones que utilizan un modelo trilineal para el diagrama esfuerzo deformación.

En la **Figura 23**, se puede observar los valores del módulo de elasticidad en la tercera fase, en la cual las fisuras se estabilizan en la matriz, para dejar todo el trabajo de refuerzo a las fibras.

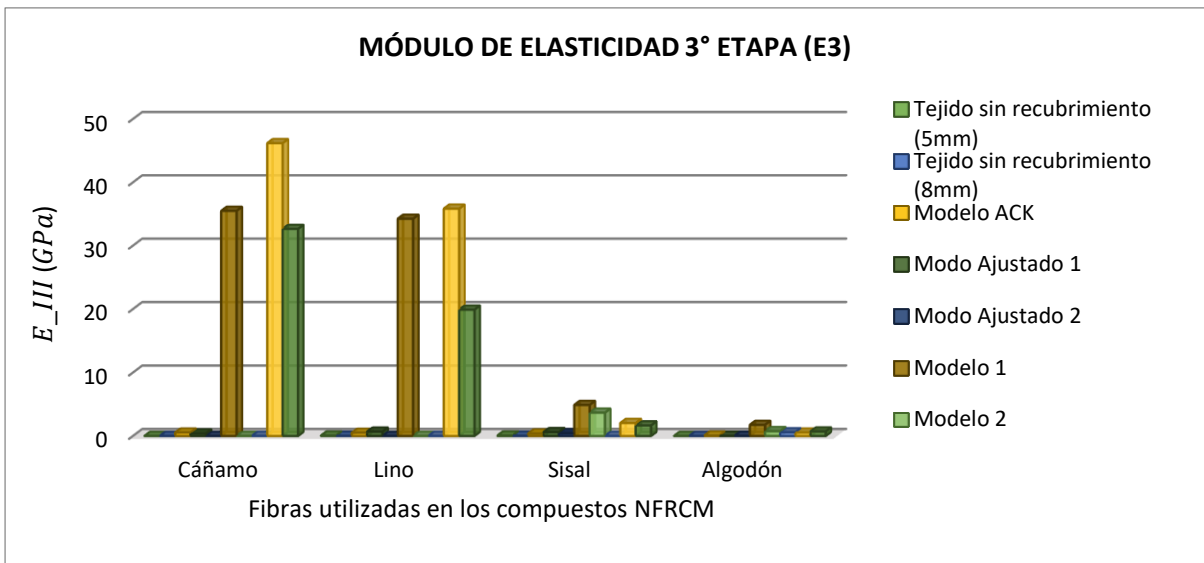


Figura 23, Resultados del módulo de elasticidad de compuestos NFRCM.

Fuente: Benítez W.

Los resultados del módulo elástico en la tercera etapa guardan cierta similitud con los de la primera etapa del ensayo, siendo las resinas de recubrimiento las de mayor influencia en los resultados, interviniendo de forma contundente en los compuestos, ya que no solo mejora en la interacción entre la interfase malla matriz si no también mejoran las propiedades de la fibra sola, sin olvidar que los extremos de las fibras en algunas partes aún siguen unidas a la matriz hasta su posterior falla.

Los resultados experimentales en esta etapa varían mucho con los resultados obtenidos a través de los otros métodos. En todas las pruebas realizadas se puede notar esta diferencia, eliminando de la gráfica los valores de las investigaciones experimentales (Tejidos recubiertos con resina epoxi y polyester) y dos resultados de los modelos computacionales (Modelo 1 y 2) que arrojaron los valores más altos, lo cual no ayuda a apreciar todos los resultados.

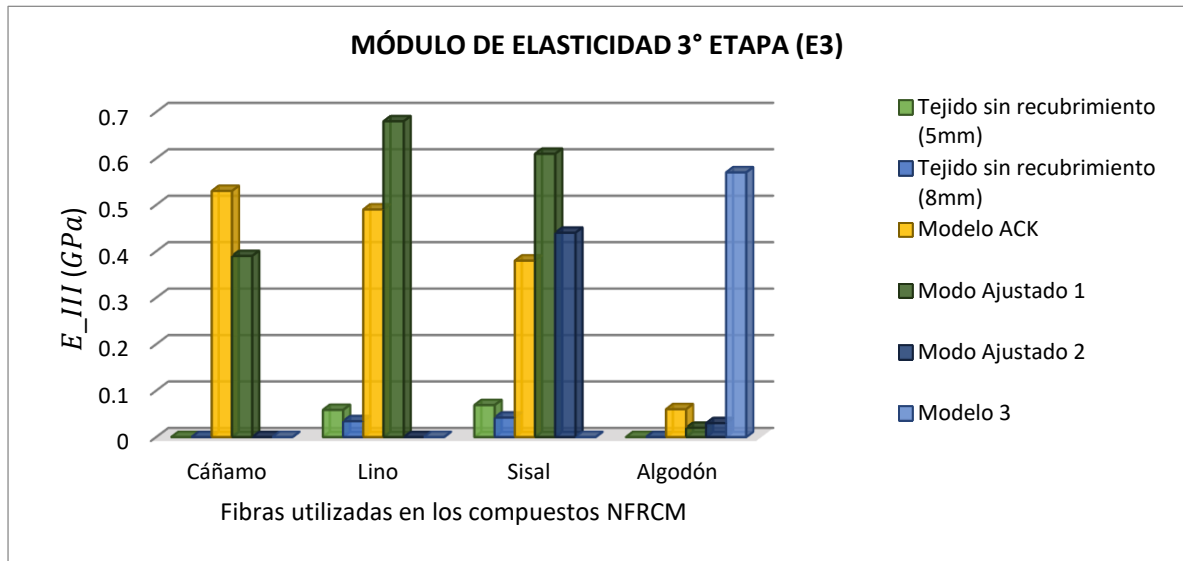


Figura 24, Resultados del módulo de elasticidad de compuestos NFRCM.

Fuente: Benítez W.

En los resultados entre los siguientes estudios: experimentales sin recubrimiento de las fibras, resultados analíticos tomando en cuenta fibras recubiertas y un modelo computacional en el caso del algodón como refuerzo. Se puede notar que las fibras de refuerzo con mejores propiedades son las de lino, también se visualiza que las fibras de algodón son las que tienen resultados con menos variación entre todas las investigaciones, contrastado con la gran variación en los datos de manera general que se nota en la **Figura 19**. Estos valores se producen por el comportamiento tan variado e impredecible que se presenta en la última etapa de la deformación de las probetas.

4.1.2.4 Interacción de los compuestos FRCM con un sustrato de hormigón armado.

Gran parte de las investigaciones se enfocan en compuestos FRCM como refuerzo para elementos de hormigón, pero con fibras de refuerzo sintéticas. En el caso de compuestos NFRCM, los estudios apuntan principalmente al refuerzo de elementos de mampostería, mientras que, en aplicaciones experimentales en elementos de hormigón, no se han llevado a cabo estudios, o su número es muy limitado. Estudios analíticos nos dan una pauta de cómo se podrían comportar estos compuestos reforzando elementos de hormigón armado, y en otros estudios (Ascione et al., 2018; Focacci et al., 2017) mencionan que la interacción en la interfase compuesto FRCM y elementos de hormigón depende básicamente de la matriz y el recubrimiento de la fibra, en caso de tenerla. Por lo cual, es necesario analizar estas investigaciones como una base comparativa del comportamiento de los compuestos NFRCM colocados como refuerzo en elementos externos.

Varias investigaciones recopiladas en este trabajo nos muestran diferentes enfoques y cómo podemos asociar los estudios entre sí. Se ha tomado como referencia principal a 25 estudios que muestren cierta relación y nos ayudan en la caracterización de las propiedades de los compuestos NFRCM reforzando elementos de hormigón armado. De estas investigaciones el 28% se orientan al análisis de los compuestos NFRCM sin ser aplicados a ningún elemento estructural, el 48% apunta al estudio de elementos de hormigón reforzados con compuestos FRCM (reforzados con otro tipo de tejidos) y finalmente el 24% restante de las investigaciones trata compuestos NFRCM reforzando elementos de mampostería.

4.1.2.4.1 Comportamiento y mecanismos de falla en la interfase FRCM-Elemento de hormigón.

Diversas investigaciones referencian la interacción en la interfase refuerzo-elemento, (Ascione et al., 2018; Carloni & Focacci, 2015; Escrig et al., 2017; Focacci et al., 2017; Focacci & Carloni, 2015). A pesar de tratarse de investigaciones con diferentes enfoques, mencionan a los elementos que influyen en esta interacción y como se relacionan, es decir, que la interacción en la interfase del refuerzo con elementos de mampostería guarda cierta similitud con la interacción en elementos de hormigón, pues así lo ratifica el estudio de Focacci et al., (2017), donde estudia esta interacción en juntas de hormigón, basándose en las investigaciones previas de Carloni & Focacci, (2015) y Focacci & Carloni, (2015). Estas investigaciones describen y detallan los cálculos para la obtención de los valores requeridos para la aplicación de la ley de material cohesivo “CML”. Por otra parte, los estudios de (Ascione et al., 2018; Escrig et al., 2017) mencionan los fenómenos producidos en la interfase durante las experimentaciones de los compuestos reforzando elementos de mampostería en el estudio y de hormigón en el segundo.

Las fallas que se presentan y analizan en esta sección son; el desprendimiento del compuesto FRCM del elemento RC entre esta interfase. En el instante en que los esfuerzos externos comienzan a trabajar en el elemento de hormigón, al cual se encuentra adherido el compuesto de refuerzo, se pueden producir dos tipos de fallas en la interfase. Estas fallas son analizadas en los estudios de (Ascione et al., 2018; Focacci et al., 2017), donde se menciona que se puede producir la falla en la interfaz Matriz-Fibra o FRCM-Sustrato, como se observa en la **Figura 25**.

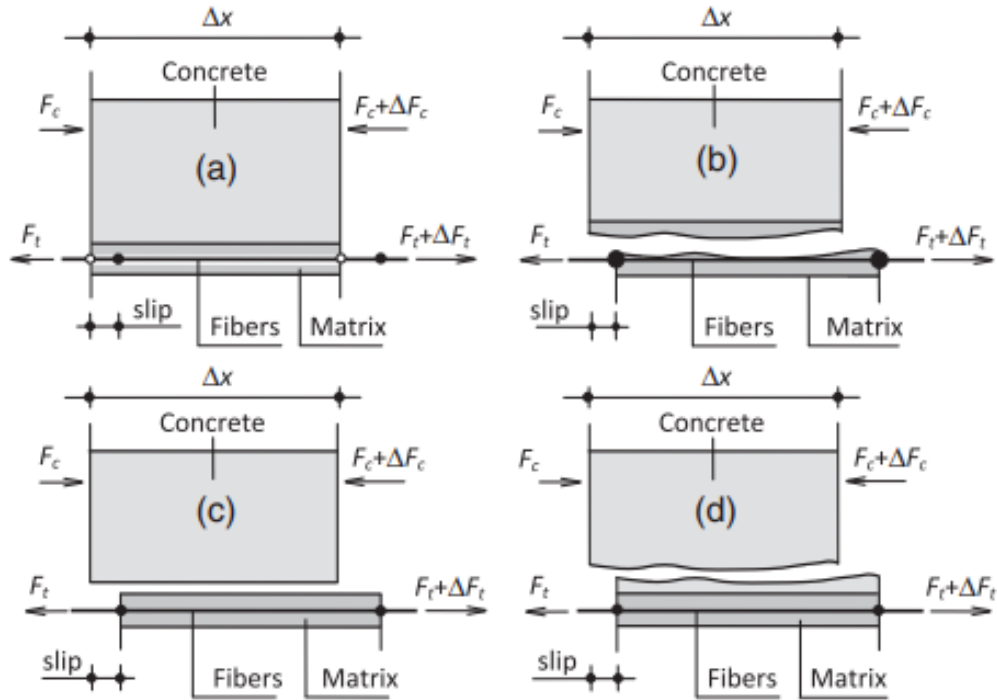


Figura 25, Tipos de fallas en la interfase FRCM-Sustrato de hormigón.

Fuente: Focacci et al., (2017)

La pérdida de acción compuesta se ve presente en el momento de estas fallas. En la **Figura 25**, en los casos (a) y (b) se observa fallas en la interfase Matriz-Fibra, en el caso (a) se observa un deslizamiento de la fibra mientras en el caso (b) se presenta una falla interlaminar o deslaminación de la fibra. En los casos (c) y (d) la falla es producida en la interfase FRCM-Sustrato, en el caso (c) se nota el desprendimiento de toda la tira de compuesto FRCM, por otro lado, en el caso (d) se presencia el desprendimiento de una capa de sustrato adherida al compuesto FRCM.

En el trabajo de Focacci et al., (2017) se utilizó el método CML con calibración indirecta y se predijo con precisión las respuestas de carga experimental, en comparación con los resultados ensayados experimentalmente se presentaron resultados confiables, lo cual es de gran ayuda para poder pronosticar los esfuerzos y las grietas que se van a producir en el compuesto reforzando un elemento de hormigón.

En la investigación realizada por Escrig et al., (2017) se menciona la ubicación de los tejidos de refuerzo para evitar fallas por despegue, y que solo se ubican en los extremos de vigas, en el caso de refuerzos a flexión en elementos, así como la eliminación de los granos finos de la superficie del hormigón donde se colocará el encamisado en forma de “U”.

4.1.2.4.2 Comportamiento de los elementos RC reforzados con compuestos FRCM.

Las investigaciones experimentales que se han llevado a cabo nos muestran resultados prometedores de los compuestos NFRCM reforzando elementos RC. Sea el caso de columnas o vigas. En el estudio de Papanicolaou1 & Papantoniou, (2009) mencionan una mejora en la capacidad de carga y deformación de las vigas reforzadas, se menciona además que el uso de fustes prefabricados SiP-TRC para columnas mostraría mejores resultados si se garantiza una práctica de construcción in situ adecuada, evitando el pandeo de las láminas prefabricadas de refuerzo. Por otro lado, Bournas et al., (2007) hace referencia que los compuestos TRM aplicados en columnas proporcionan una ganancia en la resistencia a compresión y la capacidad de deformación de la columna, al lograr el retraso de las barras longitudinales de refuerzo, por lo cual mencionan que el encamisado con compuestos TRM reforzados con tejidos de carbono es de gran ayuda para el confinamiento de las columnas RC, incluidas columnas a reforzar que presenten deficiencia y más aún en zonas de mayor actividad sísmica. En el trabajo de Triantafyllou et al., (2006) se presenta un refuerzo con fibras de polipropileno y carbono combinando tejidos. Los resultados experimentales coinciden en una mejora en cuanto a la compresión y la capacidad de deformación, del estudio de Bournas et al., (2007), mencionando además una fractura progresiva del compuesto. Además, se realiza una comparación con el refuerzo de compuestos FRP que es de gran ayuda para esta investigación

La investigación de Triantafyllou & Papanicolaou, (2006) menciona una ganancia en la capacidad de acero de los elementos RC al ser reforzados por compuestos TRM. Se hace referencia a las capas de textil combinado de polipropileno y carbono que refuerzan al compuesto además de sus opciones de colocación y como se ve mejorado el comportamiento del elemento, en función de las capas aplicadas. La capacidad de los elementos es beneficiada, evitando fallas repentinas en los elementos ensayados y activando así la fluencia por flexión de los elementos. Los resultados de este estudio hacen referencia, a que con la aplicación de una sola capa de refuerzo con tejido de espesor nominal igual a 0.047mm, hizo mejorar su capacidad a corte, excediendo en 40kN a la viga sin refuerzo.

Se menciona además el modelado de elementos de hormigón RC reforzados a cortante con chaquetas TRM. Este proceso se puede realizar a través de la introducción del coeficiente de eficacia de chaqueta, mismo que se puede derivar experimentalmente. En otro estudio a flexión a vigas RC realizado por Escrig et al., (2017) se menciona como los compuestos afectan al patrón de fisuración de las vigas ensayadas, afirmando una relación entre el patrón de fisuración y el comportamiento mecánico de la viga. Existe además una mejora en los incrementos del momento de flexión en la primera fisura, un aumento aproximado entre el 35% y 27% sin aplicar ningún incremento en el caso del último momento de flexión. La capacidad última a flexión de las vigas reforzadas con FRCM se ve afectada por la adherencia entre malla matriz de compuesto principalmente. A continuación, en la **Figura 26**. se puede observar la imagen de una viga reforzada con compuestos FRCM tradicionales.



Figura 26, Vigas RC reforzadas con compuestos FRCM.

Fuente: Escrig et al., (2017)

4.1.3 Usos y aplicaciones de los materiales compuestos NFRCM en elementos de hormigón armado.

Pese a no contar con investigaciones suficientes, se puede encaminar la utilidad de los compuestos FRCM en función de estudios comparativos y analíticos de los mismos, que nos dan como referencia el comportamiento de los compuestos por separado y como se comportarían reforzando un elemento, así como la similitud en su comportamiento con otros tipos de compuestos FRCM donde sus tejidos de fibras sintéticas son recubiertos de igual manera que los tejidos de origen vegetal. Se observarían también las mismas variaciones en los esfuerzos límites que se observaron en compuesto FRCM de fibras sintéticas, pero teóricamente no existiría una variación como refuerzo en elementos de concreto.

4.1.3.1 Refuerzo estructural para cargas dinámicas.

La investigación de Jaume et al., (2020) se enfoca en el estudio mecánico de mallas textiles vegetales para refuerzo de estructuras, se analiza diversos tipos de fibras estudiados con anterioridad en compuestos NFRCM. Con la ayuda de estos datos se enfoca las fibras a determinados refuerzos, basados en los resultados de los ensayos de las fibras por separado. En este estudio además de analizar las fibras, se estudia también como varían los resultados en función del tipo de recubrimiento utilizado. Se refieren entre otros aspectos a la resina de polyester como el recubrimiento que presenta más capacidad de deformación, siendo esta la más flexible, por tanto, aumenta la deformación de la malla de refuerzo. Esta característica será útil en el caso de utilizar un textil con fibra de algodón, ya que este tejido comparte esta característica con el textil. Esta combinación es la más indicada para un refuerzo estructural donde se solicite disipar la energía de la estructura, como la de las cargas dinámicas. En cuanto a la tensión última, en las fibras de algodón no se encuentran diferencias considerables respecto al tipo de recubrimiento, estos datos mencionados en el estudio son tomados en cuenta, ya que nos

basamos en el comportamiento de los compuestos FRCM sometidos a esfuerzos externos, donde gran parte de los autores coinciden en el estado multifisura del compuesto, esto nos da como resultado que las tensiones son soportadas por el textil en su última etapa.

4.1.3.2 Refuerzo rígido de estructuras.

Los refuerzos textiles presentan diferentes tipos de características según sus propiedades. En este caso, se enfocan en los tejidos de fibras de lino y de cáñamo como los más adecuados, debido a su origen y de la parte de planta de donde son extraídos, ya que se extraen del tallo. Estas fibras presentan una menor capacidad de absorción en comparación con las fibras de algodón. Los resultados de los ensayos no presentan gran variación en función del tipo de recubrimiento, según el estudio de Jaume et al., (2020), y sus valores son prometedores para ser utilizados como refuerzos estructurales, especialmente en el caso de un refuerzo rígido, mismos que son de gran ayuda para aumentar la rigidez del elemento a reforzar, como, por ejemplo; para reducir la flecha de una viga de hormigón armado.

4.1.3.3 Compuestos SiP-TRC como refuerzo en sustitución de barras de acero discretas en vigas.

El compuesto de refuerzo SiP-TRC puede servir como refuerzo principal de las vigas compuestas, sustituyendo las barras de acero que refuerzan originalmente a la viga, pues sirve como sustituto de las barras discretas y da como resultado ahorros de masa, pues así lo menciona Papanicolaou¹ & Papantoniou, (2009) en su estudio.

En este trabajo, además, se realiza la propuesta de idealización del perfil de deformación a lo largo de la sección transversal de la fibra, analizando esta sección en base al modelado de la fibra. Al encontrar el perfil de deformación se puede predecir las capacidades últimas de flexión de vigas compuestas de TRC/hormigón, convirtiéndose en una herramienta confiable para la predicción de estos valores.

4.1.3.4 Compuestos FRCM para mejorar la capacidad de carga y deformación de vigas RC.

Varios estudios (Escrig et al., 2017; Papanicolaou¹ & Papantoniou, 2009; Triantafillou & Papanicolaou, 2006) se refieren a los compuestos FRCM como una herramienta de refuerzo para la capacidad de carga de las vigas, reduciendo sus fisuras, aumentando la capacidad a flexión de las vigas y mejorando la rigidez. Por otra parte, la ductilidad de los elementos se vería un poco afectada. Las características y resultados de los estudios citados varían entre ellos, en el caso del primer estudio, el refuerzo se coloca en dos zonas, solamente con un encamisado en forma de U, mientras que en los otros estudios, el recubrimiento con el compuesto de refuerzo es completo, por lo cual los resultados en el ámbito de ductilidad no coinciden, siendo perjudiciales solo en el primer caso y de manera mínima, mientras que en los otros casos la

ductilidad se ve mejorado en la primera fase de deformación, donde la fluencia se activa en el compuesto de forma más rápida.

4.1.3.5 Chaquetas de compuesto FRCM para confinamiento de columnas RC.

Los estudios de (Bournas et al., 2007; Triantafillou et al., 2006) se enfocaron en el refuerzo de columnas RC con compuestos FRCM, obteniendo resultados positivos, en el caso de columnas con capacidad limitada, debido al pandeo de las barras longitudinales, mejorando su capacidad de compresión y la capacidad de deformación del elemento. Esto se debe a que el refuerzo retrasaba el pandeo de las barras longitudinales, esta ganancia se veía mejorada con el aumento de las capas de refuerzo ya que proporciona un mejor confinamiento del elemento. Se hace referencia también como refuerzo, a elementos ya definidos antiguamente con detalles deficientes, pues las camisas de TRM aumentan la capacidad de deformación cíclica y la disipación de energía de las columnas RC. En la investigación comparativa se puede verificar que, en contraste con sus contrapartes a base de epoxi, las chaquetas textiles impregnadas con mortero suministraron aproximadamente la misma efectividad en cuanto a la resistencia y en cuanto a la deformación última se presentó una leve diferencia, lo cual nos da una idea de cómo se guarda similitud entre diferentes tipos de compuestos de refuerzo.

4.1.3.6 Reforzamiento a flexión de losas bidireccionales.

Con la finalidad de reemplazar los compuestos FRP comúnmente analizados en el refuerzo de losa, se encuentra una salida mediante los compuestos FRCM-TRM, que presentan un menor riesgo que las matrices de epoxi y con características mecánicas adecuadas para el refuerzo, sin embargo, en el estudio de Kadhim et al., (2022) se menciona que los compuestos FRCM han tenido una investigación y aplicaciones muy limitadas en losas de concreto reforzado bidireccionales. En este estudio se desarrolla un modelo tridimensional de elementos finitos para losas reforzadas con FRCM, que incorpora la no linealidad del concreto y el agrietamiento y ruptura. Además, se validaron los datos con un estudio paramétrico, examinando los efectos del área de cobertura del compuesto. Se menciona además el uso de tiras de compuesto FRCM para reforzar la losa, obteniendo como resultado principal la mejora de la resistencia última (P_u), con 84% de aumento de la misma. Por último, se dedujeron las expresiones para la deformación efectiva del FRCM y se lograron predicciones más efectivas para la carga última (P_u).

4.1.3.7 Reforzamiento a cargas cíclicas y fatiga.

En los estudios de (Calabrese et al., 2022; Wei et al., 2022) se mencionan a los compuestos FRCM como sistemas de refuerzo para elementos de concreto reforzado, ayudando a mejorar sus características mecánicas y el rendimiento a largo plazo de los elementos RC. Se menciona además la falta de estudios de estos compuestos, especialmente en el ámbito de fatiga de los compuestos FRCM, por lo cual la segunda investigación se enfoca en este estudio y además el de vigas reforzadas a flexión con FRCM, realizando pruebas de carga cíclica en los

dos tipos de probetas ensayadas, obteniendo como resultado, que las placas de compuesto FRCC soportan mejor la fatiga producida por las cargas cíclicas en comparación con el acero de refuerzo. Por otro lado, las pruebas en las vigas arrojaron resultados que variaban directamente en función del número de capas de refuerzo que tenía el elemento RC, concluyendo que los compuestos FRCC son de gran ayuda para alargar la vida útil a fatiga de los elementos, debido a la redistribución de las tensiones del acero de refuerzo. No se debe olvidar la calidad de la unión que debe existir entre el compuesto de refuerzo y el elemento RC, ya que también influye en el comportamiento mecánico.

4.1.3.8 Refuerzo de vigas RC dañadas por corrosión.

La investigación realizada por Bresan et al., (2022) evaluó experimentalmente a los compuestos FRCC como refuerzo y su eficacia reforzando elementos RC. Este estudio se basó en la rehabilitación de vigas de hormigón armado que se encontraban afectadas por corrosión en el acero de refuerzo a tracción, por lo cual los compuestos FRCC fueron colocados como refuerzo a flexión en cuatro zonas, que posteriormente serían afectadas por las cargas cíclicas a flexión en la viga. Los ensayos dieron resultados positivos en las vigas dañadas reforzadas, aumentando significativamente el rendimiento de las vigas y su capacidad final. Se demostró la eficiencia del compuesto FRCC sometido a cargas cíclicas, logrando alargar la vida cíclica del elemento hasta cinco veces en comparación con la viga no reforzada.

4.2 Potencial de los NFRCC para el reforzamiento de elementos de hormigón armado y los retos que se deberán enfrentar en su estudio.

Los materiales compuestos han evolucionado con el tiempo, buscando mejorar sus características como refuerzo y en su producción. La industria de la construcción se ha interesado en este crecimiento de los materiales compuestos y ha desarrollado nuevos materiales para poder aprovecharlos en diferentes usos. Los compuestos FRCC, en particular, han despertado gran interés en los últimos años dentro de la ingeniería civil, como lo menciona Ascione et al., (2018).

Las investigaciones de compuestos NFRCC realizadas hasta la actualidad son escasas, más escasas aún si buscamos compuestos empleados como refuerzo para elementos de hormigón armado. Los principales trabajos de experimentación y caracterización de propiedades de estos compuestos son realizados con un número limitado de tipos de tejidos. Varios autores (Ahmad & Fan, 2017; Barilli et al., 2018; Mercedes et al., 2018; Mercedes et al., 2019; Onuaguluchi & Banthia, 2016) coinciden en realizar el análisis de los compuestos NFRCC mediante ensayos de tracción, siendo el tejido más común el tejido de sisal, seguido de los tejidos de lino y cáñamo. Estas investigaciones nos muestran principalmente las propiedades a tracción y los módulos de elasticidad de los compuestos NFRCC.

Las investigaciones acerca de las propiedades de estos compuestos reforzando a elementos estructurales de hormigón son muy limitadas. Sin embargo, en cuanto al uso de este tipo de refuerzo NFRCM en elementos de mampostería se puede evidenciar un gran número de investigaciones, como se puede evidenciar en las investigaciones de (Ascione et al., 2018; Carloni & Focacci, 2016; Cevallos et al., 2015; de Carvalho et al., 2017; de Carvalho et al., 2019; De Santis et al., 2019; Focacci & Carloni, 2015; Mercedes et al., 2022; Olivito, Cevallos & Carrozzini, 2014; Olivito et al., 2014). Por otra parte, en el estudio presentado por Jaume et al., (2020), se realiza un análisis de los tejidos en base a ensayos, para otorgar un uso estructural específico de estos tejidos en un compuesto de refuerzo.

Las razones por las cuales no existen estudios de compuestos NFRCM reforzando elementos de hormigón armado, se podría atribuir principalmente a que este campo de los compuestos de matriz cementicia es muy joven aun, y se busca ganar un espacio frente a los compuestos de refuerzo más comunes, como los de matriz polimérica.

Otro aspecto que influye en el estudio de estos compuestos, es el de los tejidos de refuerzo. Donde los tejidos de origen vegetal, de igual forma carecen de estudios previos que ayuden a predecir el comportamiento de estas fibras en forma de tejidos dentro de un ambiente alcalino, así como también de los tejidos revestidos. El uso de este tipo de fibras naturales, si bien representa un avance en la sostenibilidad de la producción, también muestra desventajas al ser un material relativamente débil y susceptible a ataques de agentes externos al entrar en contacto con la fibra.

El comportamiento del compuesto frente a esfuerzos externos en elementos de hormigón también ha limitado la realización de estos estudios, puesto que estos materiales se comportan de forma particular, con una interacción entre la malla de refuerzo y la matriz que es muy impredecible e inestable según el estudio de Aveston et al., (1971).

Los compuestos con estos tipos de matriz presentan un estado de multifisuración. Este estado presenta tres etapas; la primera etapa que pertenece a la etapa elástica según Aveston & Kelly, (1973) es la que limita al estudio de estos compuestos. Esta etapa elástica del compuesto NFRCM interfiere con más fuerza, al tratarse de una interacción con un elemento de hormigón. Esta etapa lineal en los compuestos de matrices cerámicas o frágiles es muy pequeña, lo cual lleva a que el compuesto se fracture en su matriz de manera prematura.

En los compuestos de matriz cementicia se considera que no hay conexión entre los desplazamientos elásticos de las fibras y los de la matriz, a diferencia de los compuestos de matriz polimérica, donde la ductilidad se presenta de forma más rápida, ya que presenta una deformación de la matriz en conjunto con los tejidos cercanamente uniforme. Estas razones empujan a los investigadores a implementar características de refuerzo diferentes a los elementos estructurales.

Si revisamos los estudios de compuestos NFRCM reforzando elementos de mampostería, encontramos varias investigaciones, esto debido a que los esfuerzos previstos en los elementos de mampostería son generalmente menores a los de los elementos estructurales

de hormigón armado, por lo cual es más factible la aplicación de refuerzos con una matriz de falla frágil.

Los compuestos NFRCM presentan una interacción favorable entre el compuesto y el elemento de mampostería. La rigidez a tracción de los elementos de mampostería se ve mejorada significativamente por los compuestos NFRCM, ya que los esfuerzos aplicados son suficientes para que actué el refuerzo de la manera más óptima, activando la interacción de la malla con la matriz del refuerzo, es decir; el material compuesto de matriz cementicia reforzando elementos de mampostería. En este caso, el sistema de refuerzo comienza a ser aprovechado desde la primera etapa de su deformación, ganando más protagonismo en la segunda fase, donde ocurren las fisuraciones. Mientras que estos compuestos de matriz cementicia reforzando elementos de hormigón, comienzan a ser aprovechados desde el cambio de etapa 2 a la etapa 3, cuando las fisuras se estabilizan y las fibras comienzan a trabajar por separado, pues existe una gran similitud entre los esfuerzos necesarios para comenzar las fisuras en la matriz del compuesto y el elemento, esto debido a que es el mismo material y que los niveles de esfuerzos que se transmiten del elemento a la matriz es mayor en elementos estructurales de hormigón armado.

En la evolución constante que existe en los materiales de construcción, se debe tomar en cuenta la necesidad de contar con una normativa acerca de los materiales compuestos NFRCM, ya que presentan grandes características mecánicas como compuestos de refuerzo, además que su producción es sostenible. La creación de una normativa aportaría de gran manera en la formación y estudios de estos compuestos, con regularizaciones de ensayos requeridos, tanto a las fibras como a los tejidos vegetales. Para posteriormente ensayar los compuestos a diferentes esfuerzos.

Sería de gran ayuda contar con una normalización de los procesos de colocación del refuerzo en estructuras de hormigón, además de definir cuáles son los escenarios más adecuados para utilizar estos compuestos como refuerzo.

Las investigaciones futuras se deberían enfocar, tanto en el estudio de las interacciones de los tejidos con el recubrimiento, así como su influencia dentro del compuesto de matriz cementicia. Los estudios de las fibras naturales usadas como refuerzo de los compuestos NFRCM deberían ampliarse, considerando sus propiedades mecánicas y el comportamiento dentro del compuesto.

La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos NFRCM aún no están del todo cubiertas, por lo cual se debería realizar más investigaciones que nos aporten una mayor cantidad de información acerca de estas propiedades, y estos valores deberían obtenerse de manera experimental o analítica.

Para el caso del análisis de los compuestos reforzando elementos de hormigón armado, se podría empezar por la idealización de modelos numéricos computacionales, que mediante software propongan la inclusión de compuestos NFRCM reforzando elementos RC. Estos análisis se podrían llevar a cabo basándose en modelos numéricos propuestos tanto para NFRCM como para otro tipo de compuestos, que simulan el comportamiento del sistema de

refuerzo frente a esfuerzos externos. En el caso de los modelos para compuestos NFRCM se obtuvieron resultados muy similares a los resultados experimentales, como se pudo evidenciar en las investigaciones de Mercedes et al., (2018) y Mercedes et al., (2019).

Con el crecimiento de las investigaciones acerca de los compuestos NFRCM y su implementación en elementos de hormigón armado podríamos obtener resultados precisos de sus propiedades, y analizar la interacción de forma real entre un compuesto de refuerzo con fibras vegetales y un elemento estructural con la misma matriz. Se lograría predecir además el tiempo de vida de los compuestos aplicados a elementos estructurales, y como varían sus propiedades con el tiempo. Con estos estudios además se podría ampliar la aplicación de los compuestos NFRCM, y proponer otro tipo de usos, como el reforzamiento de elementos RC, tales como vigas, columnas y losas. El aprovechamiento de estos materiales se debe explotar al máximo, por sus características y lo que implica reforzar un compuesto con fibras naturales. La versatilidad que tienen este tipo de compuestos como un sistema de refuerzo es muy amplia, más aún considerando que se usan tejidos de fibras que presentan una buena relación de costo/beneficio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

- Los compuestos NFRCM utilizan diversos tipos de fibras como refuerzo, los tejidos que son utilizados más comúnmente para el estudio del comportamiento mecánico de estos compuestos son los de sisal en primer lugar, seguido por los de cáñamo y lino, para finalizar con los tejidos de fibras de algodón. Otras fibras son estudiadas por separado y aplicadas de forma diferente en compuestos FRCM, por lo cual no se logró realizar un contraste. El proceso para la obtención de estos tejidos representa un aporte en el avance ecológico y de sostenibilidad que se busca en la actualidad, ya que son materias primas que se pueden conseguir con facilidad, e incluso se las puede reciclar, además de provenir de fuentes renovables. Para la extracción de estas fibras existen diversos procesos, los cuales tienen un bajo impacto con el medio ambiente. Es por estas razones que estas fibras naturales han despertado la atención en las últimas décadas y se van ganando un espacio en usos tales como sistemas de refuerzo, remplazando las fibras sintéticas, que tienen un impacto ambiental alto en su producción, sin olvidar que las propiedades mecánicas son similares a las de ciertos tipos de fibras sintéticas y su comportamiento reforzando los compuestos FRCM también guarda similitud. Por lo cual estos tejidos de origen vegetal resultan ser una solución prometedora para la elaboración de compuestos de matriz cementicia.
- La elaboración de los compuestos NFRCM consta de diversas etapas, dependiendo del tipo de tejido de refuerzo que se va a utilizar y si el mismo ya está listo para la aplicación en la matriz, o si solo se cuenta con las fibras para su posterior tejido en un telar. Estos procesos de formación de tejido no resultan ser un problema en caso de realizarse manualmente. La obtención de los demás materiales para la elaboración de la matriz es de común uso. Se debe tomar en cuenta que la matriz debe tener un estado de alcalinidad controlada, en caso de colocar las fibras sin recubrimiento. Pese a eso, el recubrimiento de los tejidos aporta de manera positiva al comportamiento mecánico de los compuestos, ya que ayuda a mejorar las propiedades de las fibras, así como la interacción en la interfase matriz-tejido. La cantidad de resina que se utiliza para el recubrimiento de las

fibras no representa un impacto considerable con el medio ambiente, pero si se contradice con el concepto de utilizar materias amigables con el ecosistema. Sin embargo, existen opciones como las “eco resinas”, que guardan una similitud muy alta con las resinas normales, por lo cual es la vía adecuada si se quiere contribuir a la sostenibilidad completa de estos materiales compuestos.

- La aplicación de los compuestos NFRCM en los elementos a reforzar se da luego de la preparación de sus componentes. Existen dos formas de aplicación de estos refuerzos; la primera es aplicando los tejidos de refuerzo en forma de encamisados. El tipo de encamisado depende del refuerzo que se va a realizar. Se puede colocar el compuesto de refuerzo en las zonas específicas que se quiere reforzar, para así no afectar al resto del elemento RC. Un ejemplo de esto es el refuerzo de vigas a flexión, en donde se coloca un encamisado tipo “U” en las zonas de flexión. Otro caso es el refuerzo de losas, colocando tiras discontinuas en las zonas que se predice la flexión. Por último, se cuenta con el encamisado de envoltura, donde se envuelve a todo el elemento para obtener los resultados más óptimos, como es el caso del encamisado de columnas, que sirve para aportar al confinamiento de las columnas RC. Por otra parte, están los refuerzos de encofrados integrados. Este método consta de un prefabricado a medida, que servirá como encofrado, donde se verterá y armará los elementos RC, que después del fraguado será un elemento participante, que contribuirá a la resistencia de los elementos. Este método es un poco más complicado, ya que después del prefabricado del encofrado con paredes de compuesto FRCM se debe garantizar que este no se deforme en absoluto al momento de verter el concreto in situ. En cualquiera de los dos casos, a los compuestos de refuerzo de matriz cementicia se los debe curar como cualquier concreto para garantizar sus propiedades.
- Se ha logrado analizar las propiedades de los compuestos NFRCM en función de los estudios realizados en probetas de los compuestos. En ensayos de tracción se han obtenido buenas características, mejorando su capacidad a tracción principalmente. Las fibras que mejores resultados a tracción presentan son las fibras de lino, seguido por las de sisal y algodón. Estos compuestos de matriz cementicia tienen un comportamiento particular frente a los esfuerzos externos, ya que trabajan en tres etapas diferentes, lo cual provocarían tres comportamientos diferentes de los compuestos reforzando a los

elementos de hormigón. Este comportamiento de multifisuración se presenta por el tipo de matriz y su acción compuesta con las fibras de refuerzo. Por lo cual, puede ser comparable el comportamiento de los compuestos FRCM tradicionales con los compuestos NFRCM reforzando elementos de hormigón. Esto debido a que se presentan las mismas características entre estos tipos de compuestos, con diferencias en los valores de los esfuerzos resistentes, dependiendo del tipo de tejido de refuerzo. La interacción entre las fases del compuesto y la interacción entre el compuesto y el sustrato de concreto son de gran importancia para su comportamiento frente a esfuerzos, por lo cual se debe asegurar una buena adherencia entre todos los elementos, para poder realizar un refuerzo adecuado con la longitud correcta del compuesto.

- El comportamiento de los compuestos FRCM tradicionales reforzando elementos de hormigón serviría como punto de partida para la comprensión del comportamiento de los compuestos NFRCM reforzando elementos de hormigón. Mediante el uso de estos compuestos se podrían reforzar elementos RC como vigas, columnas y losas. Su utilización se puede presentar en el refuerzo estructural para cargas dinámicas, refuerzo a rigidez de estructuras, prefabricados participantes en sustitución de barras de acero discretas en vigas, mejoramiento de capacidad de carga y deformación de vigas RC, chaquetas para confinamiento de columnas RC, reforzamiento a flexión de losas bidireccionales, reforzamiento a cargas cíclicas y fatiga, además como refuerzo de vigas RC dañadas por corrosión.
- En la actualidad, los estudios de compuestos FRCM reforzados con fibras naturales han sido ampliamente estudiados. Sin embargo, se deben realizar más estudios para mejorar la durabilidad al estar en contacto con una matriz alcalina. Los recubrimientos propuestos para la protección de las fibras son las resinas o bio-resinas, los cuales presentan los mejores resultados en estos tipos de compuestos, a diferencia de la conformación o utilización de una matriz cementicia con baja alcalinidad. Finalmente, no se ha encontrado información suficiente, acerca de compuestos NFRCM reforzando elementos de hormigón armado, lo que ha llevado a realizar una comparativa en función de las características con los compuestos FRCM tradicionales.

5.2 Recomendaciones.

- Los compuestos NFRCM presentan un gran aporte al desarrollo sostenible de la ingeniería civil, por lo cual se debería tomar en cuenta con mayor atención y trabajar en el desarrollo de una regularización de estos compuestos mediante una normativa que apoye con conceptos de conformación de los elementos de los compuestos, así como de la fabricación de los mismos y los procesos de empleo como refuerzos estructurales.
- Se recomienda investigar los vacíos presentados acerca de los compuestos NFRCM, como la caracterización completa de sus propiedades físicas y mecánicas, además de su comportamiento de multifisuración, particularmente con textiles de fibras de origen vegetal.
- Se recomienda estudiar de manera analítica y experimental, la implementación de los compuestos NFRCM reforzando elementos de hormigón armado, en diversos campos donde se los pueda aplicar, con el fin de obtener resultados verídicos y lograr un aporte en el desarrollo de la ingeniería.
- Se recomienda a partir de esta investigación, continuar con los estudios de los compuestos NFRCM con textiles de origen vegetal, en base a los resultados de modelos numéricos computacionales presentados en esta investigación, que fueron fundados y comparados con resultados experimentales, para poder predecir el comportamiento de los compuestos reforzando elementos de concreto mediante softwares.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ACI. (2018). Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete (544.4R-18).

https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=544418&Language=English&Units=US_AND_METRIC

ACI. (2020). Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures (549.4R-20).

https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=549620&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_Units

Ahmad, H., & Fan, M. (2018). Interfacial properties and structural performance of resin-coated natural fibre rebars within cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, 87, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.002>

Akbari Hadad, H., & Nanni, A. (2020). Fatigue Behavior of FRCM-Strengthened RC Beams. *Journal of Composites for Construction*, 24(6), 04020074.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001084](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001084)

Amorós, J. E. C., Gisbert, A. V. N., & Varón, D. J. (2016). *CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN EN LA INGENIERÍA. VOL. I 2016*. 3Ciencias.

Antiohos, S., Papadakis, V., & Tsimas, S. (2014). Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research*, 61-62, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.001>

ASTM. (2015). Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete (C1399/C1399M-10). https://www.astm.org/c1399_c1399m-10r15.html

- ASTM. (2019). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete “Using Beam With Third-Point Loading” (C1609/C1609M-19a).
https://www.astm.org/c1609_c1609m-19a.html
- ASTM C1557. (2015). Standard test method for tensile strength and Young ’ s modulus of fibers. ASTM International, 1–10. <https://doi.org/10.1520/C1557-14.2>
- ASTM 1341. (2013). Standard test method for flexural properties of continuous fiberreinforced advanced ceramic composites. ASTM International, 15.
<https://worldwidestandard.net/wp-content/uploads/2019/02/C-1341.pdf>
- ASTM C1018. (1997). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM International, 04(October), 7. <https://doi.org/10.1520/C1018-97>
- ASTM C78. (2002). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). ASTM International, 04.02, 1–3.
https://kupdf.net/download/astm-c78_59f9b4f2e2b6f5832c26b0f9_pdf
- Ardanuy Raso, M., & Capdevila Juan, F. J. (2011). Fibras Procedentes de Recursos Renovables: una oportunidad para innovar y mejorar la competitividad. *Revista de química e industria textil*, (205), 24-29.
- Armas-Ruiz, D., Ruiz-Galarza, S., Piován, M., Carrión-Matamoros, L., & Narváez-Muñoz, C. (2016). Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo. *Científica*, 20(1), 21-31.

- Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghamati, B., & Shin, U. C. (2007). Development of coconut coir-based lightweight cement board. *Construction and Building Materials*, 21(2), 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.028>
- Ascione, L., Carozzi, F. G., D'Antino, T., & Poggi, C. (2018). New Italian guidelines for design of externally bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for repair and strengthening of masonry and concrete structures. *Procedia Structural Integrity*, 11, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.027>
- Ascione, L., de Felice, G., & de Santis, S. (2015). A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems. *Composites Part B: Engineering*, 78, 497–506. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.079>
- Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero. (2003). *Morteros Guía General*. AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.
- Aveston, J., & Kelly, A. (1973). Theory of multiple fracture of fibrous composites. *Journal of Materials Science*, 8(3), 352–362. <https://doi.org/10.1007/bf00550155>
- Awwad, E., Mabsout, M., Hamad, B., & Khatib, H. (2011). Preliminary studies on the use of natural fibers in sustainable concrete. *Lebanese Science Journal*, 12(1), 109-117.
- Ballesteros, M. N. S. (2005). *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- BARILLI, L. (2019). Evaluation of the mechanical tensile behaviour of FRCM and NFRCM composites-analysis of a non-linear constitutive relation.
- Bercero, J. R. G. I. L., Herrero, S. B., López, A. M. C., & LÓPEZ, A. M. C. (2010). *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. UNED.

- Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones*.
Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Bezazi, A., Belaadi, A., Bourchak, M., Scarpa, F., & Boba, K. (2014). Novel extraction techniques, chemical and mechanical characterisation of *Agave americana* L. natural fibres. *Composites Part B: Engineering*, 66, 194–203.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.014>
- Bournas, D. A., Lontou, P. V., Papanicolaou C. G., & Triantafillou T. C. Textile-Reinforced Mortar versus Fiber-Reinforced Polymer Confinement in Reinforced Concrete Columns. (2007). *ACI Structural Journal*, 104(6). <https://doi.org/10.14359/18956>
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1–3), 3–9.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>
- Bressan, J., Ghrib, F., & el Ragaby, A. (2022). FRCM Strengthening of Corrosion-Damaged RC Beams Subjected to Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*, 26(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001180](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001180)
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Ciencia e ingeniería de materiales* (2.^a ed.). Reverte.
- Carlioni, C., & Focacci, F. (2016). FRP-masonry interfacial debonding: An energy balance approach to determine the influence of the mortar joints. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 55, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2015.08.003>
- Carvajal, R. R. (2018). *Fundamentos de ingeniería estructural para estudiantes de arquitectura*. Ediciones UC.

- Cerniauskas, G., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Bisby, L. A. (2020). Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 53(3).
<https://doi.org/10.1617/s11527-020-01492-x>
- Cevallos, O., & Olivito, R. (2015). Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*, 69, 256–266.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.004>
- Cisneros, J. W. M., Ccosi, P. F. V., & Gálvez, Y. G. (2020). Caracterización estructural, física y química de la fibra de rastrojo de la cosecha de piña (ananas comosus) golden como alternativa para elaborar papel. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 2(2), 314-323.
- Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets. (2006). *ACI Structural Journal*, 103(1). <https://doi.org/10.14359/15083>
- Dávila, J. L., Galeas, S., Guerrero, V. H., Pontón, P., Rosas, N. M., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales.
- D'Ambrisi, A., & Focacci, F. (2011). Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 707–720.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000218](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000218)
- de Carvalho Bello, C. B., Boem, I., Cecchi, A., Gattesco, N., & Oliveira, D. V. (2019). Experimental tests for the characterization of sisal fiber reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. *Construction and Building Materials*, 219, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.168>
- de Carvalho Bello, C. B., Cecchi, A., Meroi, E., & Oliveira, D. V. (2017). Experimental and Numerical Investigations on the Behaviour of Masonry Walls Reinforced with an

- Innovative Sisal FRCM System. *Key Engineering Materials*, 747, 190–195.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.747.190>
- de Marco, M. A. (2013). *Materiales compuestos AEMAC 2003. Volumen 1*. Reverte.
- De Santis, S., de Felice, G., & Roscini, F. (2019). Retrofitting of masonry vaults by basalt textile-reinforced mortar overlays. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(7), 1061-1077.
- Dittenber, D. B., & GangaRao, H. V. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- Djafari Petroudy, S. R. (2017). Physical and mechanical properties of natural fibers. Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction, *Faculty of New Technologies and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Mazandaran, Iran*.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>
- Petroudy, S. D. (2017). Physical and mechanical properties of natural fibers. In *Advanced high strength natural fibre composites in construction* (pp. 59-83). Woodhead Publishing.
- Escrig, C., Gil, L., & Bernat-Maso, E. (2017). Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials. *Construction and Building Materials*, 137, 317–329.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.106>
- Escrig, C., & Gil, L. (2017). Vigas de hormigón armado reforzadas a flexión con materiales tipo Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. Estudio experimental y analítico. *international center for numerical methods in engineering*.

- Focacci, F., & Carloni, C. (2015). Periodic variation of the transferable load at the FRP-masonry interface. *Composite Structures*, *129*, 90–100.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.008>
- Focacci, F., D'Antino, T., Carloni, C., Sneed, L., & Pellegrino, C. (2017). An indirect method to calibrate the interfacial cohesive material law for FRCM-concrete joints. *Materials & Design*, *128*, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.038>
- García, S. L. Q., & Salcedo, L. O. G. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Ingeniería y Desarrollo*, (20), 134-150.
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufactura Mode*. Prentice Hall.
- Gunasekaran, K., Kumar, P., & Lakshmiathy, M. (2011). Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(1), 92–98.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.053>
- Hakamy, A., Shaikh, F., & Low, I. (2014). Characteristics of hemp fabric reinforced nanoclay–cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, *50*, 27–35.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.002>
- Hasan, H. H., & Georgescu, P. (2021). Concrete Columns Strengthened with Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM). *Modelling in civil and environmental engineering*, *16*(2), 34-44.
- Hüttermann, A., Mai, C., & Kharazipour, A. (2001). Modification of lignin for the production of new compounded materials. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *55*(4), 387–384. <https://doi.org/10.1007/s002530000590>
- INEN. (2012). Cemento Portland requisistos (NTE INEN 152:2012).
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/152-5.pdf>

- Jaume, O., Bernat, E., & Capdevila, F. (2020). Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras. *universitat politècnica de catalunya*.
- JOHN, M., & THOMAS, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- Juárez Alvarado, C. A., Rodríguez López, P., Rivera Villarreal, R., & Rechy de Von Roth, M. D. L. Á. (2004). Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. *Ingenierías*, 7(22), 7-19.
- Kadhim, M. M., Jawdhari, A., Adheem, A. H., & Fam, A. (2022). Analysis and design of two-way slabs strengthened in flexure with FRCM. *Engineering Structures*, 256, 113983. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113983>
- Kumar, A., Arora, H. C., Kumar, K., Mohammed, M. A., Majumdar, A., Khamaksorn, A., & Thinnukool, O. (2022). Prediction of FRCM–Concrete Bond Strength with Machine Learning Approach. *Sustainability*, 14(2), 845. <https://doi.org/10.3390/su14020845>
- Lara, M. C., Pérez, L. R. M., Patiño, Á. E. F., & Juárez, H. Análisis y modelado 3D de máscara facial deportiva basada en material compuesto.
- Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C., & San-José, J. T. (2014). Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress. *Materials & Design*, 55, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.050>
- Machaka, M., Basha, H., Abou Chakra, H., & Elkordi, A. (2014). Alkali treatment of fan palm natural fibers for use in fiber reinforced concrete. *European scientific journal*, 10(12).
- Martín Sendra, A. (2021). *Estudio comparativo de fibras naturales para reforzar hormigón* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

- Mattone, R. (1990). Ferrocement, prefabrication, self-help for low cost housing. *Journal of ferrocement*, 20(2), 143-148.
- Mercedes, L., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2022). Numerical simulation of masonry walls strengthened with vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites and subjected to cyclic loads. *Structures*, 35, 1232–1242.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.010>
- Mercedes, L., Gil, L., & Bernat-Maso, E. (2018). Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Construction and Building Materials*, 175, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>
- Merta, I., & Tschegg, E. (2013). Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 991–997.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.060>
- Moriana, R., Vilaplana, F., Karlsson, S., & Ribes, A. (2014). Correlation of chemical, structural and thermal properties of natural fibres for their sustainable exploitation. *Carbohydrate Polymers*, 112, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.009>
- Mukhopadhyay, S., & Khatana, S. (2014). A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 45(2), 239–264.
<https://doi.org/10.1177/1528083714529806>
- Ochoa, D. H., Rodríguez, A. P., & Reyna, R. B. Materiales Compuestos con Refuerzos de Fibra de Yute en la Fabricación de Ayudas Técnicas para Discapacitados.
- Olivito, R., Cevallos, O., & Carrozzini, A. (2014). Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. *Materials & Design*, 57, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.023>

- Olivito, R., Cevallos, O., & Codispoti, R., Zuccarello, A. F., (2014). masonry columns strengthened with NFRC composites subjected to eccentric loads.
<https://iris.unical.it/handle/20.500.11770/169149>
- Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 717–736. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.007>
- Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016a). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>
- Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016b). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575–581.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Páez, A. (1986). *Hormigón armado*. Editorial Reverté.
- Papanicolaou, C. G., & Papantoniou, I. C. (2010). Mechanical Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC) / Concrete Composite Elements. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(1), 35–47. <https://doi.org/10.3151/jact.8.35>
- Peled, A., Yankelevsky, D., & Bentur, A. (1997). Microstructural characteristics of cementitious composites reinforced with woven fabrics. *Advances in Cement Research*, 9(36), 149–155. <https://doi.org/10.1680/adcr.1997.9.36.149>

- Pérez, M. A. (2014a). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación (Spanish Edition)* (1. ed.). OmniaScience.
- Pérez, M. A. (2014b). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación (Spanish Edition)* (1. ed.). OmniaScience.
- Pino, V., Akbari Hadad, H., de Caso Y Basalo, F., Nanni, A., Ali Ebead, U., & el Refai, A. (2017). Performance of FRCC-Strengthened RC Beams Subject to Fatigue. *Journal of Bridge Engineering*, 22(10), 04017079. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001107](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001107)
- Quintero, L., Cruz, J., Londoño, D., Ceballos, M., & Fajardo, J. (2016). Estudio de las propiedades mecánicas de los haces de fibras de Guadua Angustifolia Kunth ecuatoriana extraída a partir de diferentes métodos. In *XIII Congreso nacional de corrosión y IV Congreso internacional de Integridad estructural, ASCOR 2016* (pp. 296-303).
- Rodríguez Pérez, B., León Rodríguez, R. M., & Romero Cabrera, J. L. (2012). Comparación técnica, económica y ambiental de los cementos cubanos portland P-350 y PP-250 con sus equivalentes puzolánicos PP-350 y PZ-2501. *INGE CUC*.
- Sanz-Diez de Ulzurrun Casals, G. (2019). *Capacidad resistente de elementos lineales de hormigón armado reforzado con fibras bajo cargas de impacto* (Doctoral dissertation, Caminos).
- Sathishkumar, T., Navaneethakrishnan, P., & Shankar, S. (2012). Tensile and flexural properties of snake grass natural fiber reinforced isophthallic polyester composites. *Composites Science and Technology*, 72(10), 1183–1190. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.04.001>

- Sethunarayanan, R., Chockalingam, S., & Ramanathan, R. (s.f.). Natural Fiber Reinforced Concrete. *Department of Structural Engineering, Annamalai University, Annamalainagar 608 002.*
- Silva, F. D. A., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2009). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>
- Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(2), 127–143. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(99)00039-6)
- Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). Natural fiber reinforced concrete. In *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications* (pp. 154-167). Woodhead Publishing.
- Triantafillou, T. C., & Papanicolaou, C. G. (2006). Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures*, 39(1), 93–103. <https://doi.org/10.1007/s11527-005-9034-3>
- UNE. (2017). Placas planas de cemento reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo.(EN 12467:2013+A1:2017). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0058282>
- Valenzuela, J., Ulloa, I., & Rallo, M. (2003). ESTUDIO DEL ANGULO FIBRILAR Y SU RELACION CON LA EDAD CAMBIAL EN *Pinus radiata* D.DON, PROVENIENTE DE LA SEPTIMA REGION, CHILE. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 5(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2003000200003>

- Villarreal Rivera, L. (1988). *Uso actual y potencial de la vegetación de Mina, NL, un estudio biométrico de las fibras vegetales, su desarrollo, estructura y productividad* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Wang, W., & Chouw, N. (2018). Flexural behaviour of FFRP wrapped CFRC beams under static and impact loadings. *International Journal of Impact Engineering*, *111*, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.08.010>
- Wei, L., Zhu, J. H., Ueda, T., & Matsumoto, K. (2022). Performance of FRCM composites and FRCM-strengthened RC beams subjected to anodic polarization and cyclic loading. *Engineering Structures*, *250*, 113475. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113475>
- Yan, L. (2012). Effect of alkali treatment on vibration characteristics and mechanical properties of natural fabric reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *31*(13), 887–896. <https://doi.org/10.1177/0731684412449399>
- Zhang, Z., Gu, B., & Sun, B. (2014). Experimental characterizations of three-point bending fatigue behavior of four-step three-dimensional braided composite T-beam. *Journal of Industrial Textiles*, *45*(2), 171–186. <https://doi.org/10.1177/1528083714528015>
- Zhou, X., Ghaffar, S. H., Dong, W., Oladiran, O., & Fan, M. (2013). Fracture and impact properties of short discrete jute fibre-reinforced cementitious composites. *Materials & Design*, *49*, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.029>