

# MORTEROS DE CAC REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES

---

*Microestructura, evaluación físico-mecánica y  
durabilidad para su aplicación en materiales de construcción:*

*Ejemplo de pavimento.*

**Autor:**

Madelin Jaroni Del Pilar Ramírez Sánchez

**Directores:**

Josep Claramunt Blanes

Cristina Pardal March

Programa de Doctorado de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del  
Urbanismo

Departamento de Tecnología de la Arquitectura

Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona

Septiembre 2020

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH



Escola Tècnica Superior  
d'Arquitectura de Barcelona



 **creative  
commons**

La obra se distribuye bajo los términos y condiciones de la presente licencia pública de **Creative Commons** ("ccpl" o "licencia"). La obra está protegida por la ley del derecho de autor y/o por cualquier otra ley que resulte aplicable. Cualquier uso distinto del autorizado por la presente licencia o por la ley del derecho de autor está prohibido.

Se entiende que, por el mero ejercicio de cualquiera de los derechos aquí previstos sobre la obra, usted acepta y se obliga bajo los términos y condiciones de la presente licencia. El licenciante le otorga derechos aquí descritos considerando la aceptación por su parte de dichos términos y condiciones.

## Resumen

Las fibras naturales de procedencia vegetal se han convertido en una opción para refuerzo de compuestos a base de cemento, esto gracias a sus características de alta resistencia y bajo costo, y, además su gran disponibilidad, por ser este un recurso renovable.

Con el objetivo de crear compuestos cementosos altamente dúctiles y duraderos, este estudio analiza y desarrolla compuestos cementosos basados en la mezcla de composiciones a base de cemento aluminato de calcio (CAC), Metacaolín (MK) con variaciones de 0 - 50 % de contenido, y refuerzos de fibra de fieltro de lino.

En los experimentos realizados se evaluaron el efecto del MK sobre el rendimiento mecánico y la microestructura de la mezcla de cemento de la matriz; el efecto de la mezcla de cemento en el rendimiento sobre las fibras naturales; y el comportamiento a flexión y de durabilidad de los compuestos.

Los compuestos obtenidos revelaron que la adición de bajos contenidos de Metacaolín ayuda a aumentar la durabilidad de los compuestos sin provocar una disminución significativa en el rendimiento mecánico, así como también al añadir CAC, este actúa en combinación garantizando una mejor resistencia y comportamiento frente al Cemento Portland.

La evaluación de los efectos de estas matrices basadas en CAC en el refuerzo de fibra vegetal reveló que las matrices CAC podrían ser una alternativa a las matrices de cemento Portland para la durabilidad de los refuerzos de fibra vegetal. Sin embargo, el elevado costo de los CAC obliga al empleo de algún aditivo para disminuir la cantidad de cemento.

Palabras claves:

Fibras Vegetales, Durabilidad, Cornificación, Feltro.

## Abstract

The natural fibers that come from vegetable origin have become a potential and competitive option as a reinforcement composite based on cement. This is due to their high resistance and low cost features, and also their high availability as a renewable resource.

The intent of this thesis is to develop durable and strain hardening cementitious composites based on calcium aluminate cement -CAC- with variable metakaolin -MK- content -from 0 to 50 wt %- and flax non-woven natural textile reinforcement.

In the research experiments performed the effects of metakaolin -MK- on the mechanical performance and cement mixture microstructure of the matrix; the effect of the cement mixture on the performance of the natural fibers; and

the bending behavior and durability of the composites were evaluated.

The composites obtained revealed that the admixture of low metakaolin content helps increase the composites durability without causing a significant decrease in the mechanical performance, it was also found that the addition of calcium aluminate -CAC- guarantees a better resistance and behavior when compared to Portland Cement.

The evaluation of the effects on these matrices based on CAC in the vegetable fiber reinforcement showed that the matrices CAC could be an alternative to Portland Cement because of the vegetable fiber reinforcement durability. Nevertheless, the high cost of CAC obligates the use of an admixture to diminish the amount of cement.

Keywords:

Vegetable Fibers, Durability, Cornification, Non-woven.

## Abreviaturas y Símbolos

---

CAC	Cemento de Aluminato de Calcio	TiO <sub>2</sub>	Óxido de titanio
CP	Cemento Portland	Na <sub>2</sub> O	Óxido de sodio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de aluminio	K <sub>2</sub> O	Óxido de potasio
CaO	Óxido de calcio	MPa	Megapascal
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro III	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Monocalcio aluminato
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silicio	Ca	Calcio
FeO	Óxido de hierro	H <sub>2</sub> O	Agua
S <sub>2</sub>	Sulfuro	pH	Por ciento de hidrógeno
SO <sub>3</sub>	Sulfato	MK	Metacaolín
MgO	Óxido de magnesio	OH-	Hidróxido

## Unidades de medidas

---

cm	Centímetro
cm <sup>2</sup> /g	Centímetro cuadrado por gramo
g/cm <sup>3</sup>	Gramo por centímetro cúbico
g/m <sup>2</sup>	Gramo por metro cuadrado
g	Gramo
kg/m <sup>2</sup>	Kilogramo por metro cuadrado
kg	Kilogramo
kJ/kg	kilojoule por kilogramo.
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
kN	kilo newton
l/min	Litro por minuto
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
N/mm <sup>2</sup>	Newton por milímetro al cuadrado
N	Newton
µm	Micrometro

## Acrónimos de las técnicas utilizadas

---

SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopía Electrónica de Barrido )
BSE	Microscopía Electrónica de electrones Retrodispersados
EDS	Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X
EEB	Electrones retrodispersados

## Glosario

---

<b>Abrasión</b>	proceso de desgaste o destrucción producidos en la superficie terrestre por agentes externos.
<b>Aerodinámica</b>	que tiene la forma adecuada para reducir la resistencia del aire.
<b>Álcali</b>	compuesto que en disolución acuosa se comporta como una base fuerte.
<b>Alcalinidad</b>	cualidad de alcalino.
<b>Alúmina</b>	óxido de aluminio que se halla en la naturaleza, algunas veces puro y cristalizado, y por lo común, formando en combinación con la sílice y otros cuerpos, los feldespatos y las arcillas.
<b>Amianto</b>	mineral constituido por silicato de cal, alúmina y hierro, que se presenta en fibras blancas y flexibles, es incombustible y tiene efectos nocivos para la salud.
<b>Amorfo</b>	sin forma regular o bien determinada. Dicho de un cuerpo sólido no cristalino.
<b>Anfíbol</b>	mineral formado por silicatos de calcio, sodio, potasio, hierro y otros metales, de color común verde o negro, y brillo anacarado.
<b>Anhidrita:</b>	es un mineral importante en la identificación de algunas alteraciones hidrotermales relacionadas con depósitos minerales tipo pórfidos cupríferos.
<b>Asbesto:</b>	mineral de composición y caracteres semejantes a los del amianto, pero de fibras duras y rígidas, parecidas al cristal hilado y de efectos nocivos para la salud.
<b>Asbestosis:</b>	enfermedad pulmonar crónica producida por la inhalación repetida de polvo del asbesto.
<b>Carbonatación:</b>	difusión de CO <sub>2</sub> desde la atmósfera a través de poros insaturados de la matriz cementosa.
<b>Carda:</b>	especie de cepillo con púas de alambre, usado en la industria textil para limpiar y separar unas fibras de otras.
<b>Celulosa:</b>	polisacárido que forma la pared de las células vegetales y es el componente fundamental del papel.

<b>Cemento hidráulico:</b>	tipo de cemento que endurece al combinarse con agua.
<b>Cemento portland:</b>	es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con agua tiene la propiedad de conformar una masa pétreo.
<b>Clínker:</b>	compuesto que se obtiene como resultado de la sinterización en horno, de mezclas de calizas arcillosas preparadas artificialmente con adición eventual de otras materias.
<b>Composito:</b>	es cualquier material constituido por más de un componente.
<b>Conglomerante:</b>	dicho de un material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, originando nuevos compuestos.
<b>Cornificación:</b>	cambios físicos y químicos que se producen en las fibras vegetales durante el secado, principalmente encogido, formación de enlaces hidrógeno internos y pérdida irreversible de la capacidad de absorción de agua e hinchamiento.
<b>Crisotilo:</b>	es un mineral del grupo de los Silicatos, subgrupo Filosilicatos y dentro de ellos es una serpentina-caolinita.
<b>Crocidolita:</b>	a es un tipo de asbesto constituido por silicatos que contienen hierro y sodio, el cual forma parte del asbesto comercial utilizado en la elaboración de numerosos productos industriales y domésticos.
<b>Curado:</b>	endurecido, seco, fortalecido o curtido.
<b>Difractómetro:</b>	instrumento utilizado para medir la difracción de un haz de radiación incidente sobre una muestra de un material.
<b>Ductilidad:</b>	propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfálticos, los cuales, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse, permitiendo obtener alambres o hilos de dicho material.
<b>Éster:</b>	compuesto orgánico que resulta de sustituir un átomo de hidrógeno de un ácido por un radical alcohólico.
<b>Éter:</b>	líquido transparente, inflamable y volátil, de olor penetrante y sabor dulce, obtenido al calentar a elevada temperatura una mezcla de alcohol etílico y ácido sulfúrico.
<b>Exotérmico:</b>	dicho de un proceso que va acompañado de desprendimiento de calor.

<b>Extrusión:</b>	es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada.
<b>Fibra:</b>	producto textil sintético, por oposición al de origen natural.
<b>Fibro cemento:</b>	material constituido por la mezcla de cemento y fibras de refuerzo, utilizado en la fabricación de planchas, tuberías, depósitos, etc.
<b>Financiarización:</b>	ascenso de la importancia del capital financiero dentro del funcionamiento económico.
<b>Fisura:</b>	Separación delgada que se produce en un objeto
<b>Fraguado:</b>	acción y efecto de fraguar (endurecerse la cal, el yeso, etc.).
<b>Gases de efecto invernadero:</b>	gases atmosféricos que absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo.
<b>Hidratos:</b>	combinación de un cuerpo con el agua.
<b>Hidrofílica</b>	molécula que puede enlazarse temporalmente con el agua a través de un enlace hidrógeno.
<b>Hidrófobas:</b>	dicho de una materia o una sustancia: Que no adsorbe el agua.
<b>Hormigón:</b>	material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava y cemento o cal, y que, al fraguar, adquiere más resistencia, retiene gas, generalmente aire en forma de porosidad.
<b>Horno de cubilote:</b>	es un tipo de horno cilíndrico vertical de aproximadamente 6 metros de alto, el cual lleva los metales en el colocados, hasta el estado líquido y permite su colado, el mismo puede ser utilizado para la fabricación de casi todas las aleaciones de hierro.
<b>Horno de reverbero:</b>	es un tipo de horno generalmente rectangular, cubierto por una bóveda de ladrillo refractario, que refleja (o reverbera) el calor producido en un sitio independiente del hogar donde se hace la lumbre.
<b>Horno rotatorio:</b>	es una cámara cilíndrica en rotación sobre su propio eje y levemente inclinada. Se concibe para gasificar residuos sólidos, lodos o líquidos viscosos.



<b>Huella de carbono:</b>	es la cantidad de emisión de gases relevantes al cambio climático asociada a las actividades de producción o consumo de los seres humanos.
<b>Imagenología:</b>	estudio y utilización de las imágenes producidas por los rayos X, el ultrasonido, la resonancia, etc.
<b>Inocuo:</b>	que no hace daño.
<b>Isopropanol:</b>	disolvente orgánico que se usa para deshidratar pastas de cemento.
<b>Isotérmico:</b>	dicho de un proceso que hace permanecer constante la temperatura.
<b>Isotrópico:</b>	cuyas propiedades no varían con la dirección.
<b>Lignina:</b>	es una clase de polímeros orgánicos complejos que forman materiales estructurales importantes en los tejidos de soporte de plantas vasculares y de algunas algas e insectos.
<b>Maleable:</b>	dicho de un material: que se le puede dar otra forma sin romperlo.
<b>Mesotelioma:</b>	es un cáncer que afecta a ese tejido. Suele comenzar en los pulmones, pero también puede comenzar en el abdomen u otros órganos.
<b>Metacaolín:</b>	es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas a 550 °C, produciéndose una transformación de su estructura cristalina.
<b>Metaestable:</b>	dicho de un sistema que se encuentra en equilibrio aparente, pero que puede cambiar a un estado más estable.
<b>Micelas:</b>	conjunto de moléculas que constituye una de las fases de los coloides.
<b>Micrómetro:</b>	es una unidad de medida en el sistema métrico, también conocida como micrón.
<b>Micrografía:</b>	descripción de objetos vistos con el microscopio.
<b>Mortero:</b>	conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener además algún aditivo.
<b>Mucociliar:</b>	es el mecanismo de autolimpieza de la mucosa nasal.
<b>Pavimento:</b>	es la capa o base que constituye el suelo de una construcción o de una superficie no natural.

<b>Pectina:</b>	polisacárido complejo presente en las paredes de los vegetales, que se utiliza como espesante en las industrias alimentarias, farmacéuticas y cosméticas.
<b>Permeabilidad:</b>	propiedad de algunos materiales de aumentar la densidad del campo magnético en su interior, que se expresa como el cociente entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético.
<b>Petroquímica:</b>	industria de la utilización del petróleo o el gas natural como materias primas para a la obtención de productos químicos.
<b>Potencial de hidrógeno:</b>	es la unidad de medida que describe el grado de acidez o alcalinidad.
<b>Pie de rey:</b>	es un instrumento para medir dimensiones de objetos relativamente pequeños, desde centímetros hasta fracciones de milímetros (1/10 de milímetro, 1/20 de milímetro, 1/50 de milímetro).
<b>Pirólisis:</b>	descomposición de un compuesto químico por acción del calor.
<b>Polímero:</b>	compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.
<b>Polivinilo:</b>	resina termoplástica obtenida por polimerización de derivados del vinilo.
<b>Puzolana:</b>	roca volcánica muy desmenuzada, de la misma composición que el basalto, la cual se encuentra en Puzol, y sirve para hacer, mezclada con cal, mortero hidráulico.
<b>Reología:</b>	estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos.
<b>Texturómetro:</b>	instrumento de laboratorio que se utiliza para analizar la textura de los alimentos, midiendo gran variedad de parámetros físicos.

# Índice

ÍNDICE .....	11
ÍNDICE DE TABLAS .....	13
CAPÍTULO 1 .....	19
I. INTRODUCCIÓN .....	20
<b>1.1. HISTORIA DEL FIBROCEMENTO .....</b>	<b>20</b>
I.1.1 AFECCIÓN DEL AMIANTO A LA SALUD .....	28
I.1.2 PROHIBICIÓN DEL AMIANTO .....	29
I.1.3 ALTERNATIVA VEGETAL-SINTÉTICA.....	31
<b>I.2 HIPÓTESIS .....</b>	<b>32</b>
<b>I.3 OBJETIVOS .....</b>	<b>33</b>
I.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	33
CAPÍTULO 2 .....	34
II. ESTADO DEL ARTE .....	35
<b>2.1. CEMENTO .....</b>	<b>35</b>
2.1.1. CEMENTO ALUMINATO DE CALCIO (CAC).....	35
II.1.2 METACAOLÍN (MK).....	41
II.1.3 LAS FIBRAS.....	42
<b>II.2 MATERIAL COMPUESTO .....</b>	<b>55</b>
<b>1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS .....</b>	<b>56</b>
<b>II.3 COMPORTAMIENTO DE LA FIBRA VEGETAL EN LA MATRIZ CEMENTICIA .....</b>	<b>57</b>
II.3.1 VARIACIÓN DE VOLUMEN CON LOS CAMBIOS DE HUMEDAD .....	57
II.3.2 DEGRADACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO CON LOS CICLOS SECO-HÚMEDOS. ....	61
II.3.3 MECANISMO DE TRANSPORTE .....	62
<b>II.4 ESTRATEGIAS DE MEJORA DE LA DURABILIDAD .....</b>	<b>64</b>
II.4.1 FIBRAS .....	65
II.4.2 MATRIZ.....	66
CAPÍTULO 3 .....	68
III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....	69
<b>III.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>69</b>

<b>III.2</b>	<b>OBJETIVOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.</b>	<b>70</b>
<b>III.3</b>	<b>NORMATIVA APLICABLE.</b>	<b>71</b>
<b>III.4</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>71</b>
III.4.1	CEMENTO ALUMINATO DE CALCIO	71
III.4.2	METACAOLÍN	71
III.4.3	AGUA	72
III.4.4	FLUIDIFICANTE	72
III.4.5	DESECOFRANTE	72
III.4.6	FIBRA	72
<b>III.5</b>	<b>PROCESOS DE FABRICACIÓN Y TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES.</b>	<b>73</b>
III.5.1	FABRICACIÓN DEL FIELTRO.	73
III.5.2	CARACTERÍSTICAS DEL FIELTRO.	73
III.5.3	CORNIFICACIÓN FIELTRO.	74
<b>III.6</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA LOS ENSAYOS MECÁNICOS DE LA MATRIZ</b>	<b>75</b>
<b>III.7</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE LAS PLACAS.</b>	<b>77</b>
III.7.1	RELACIÓN AGUA-AGLOMERANTE	78
III.7.2	ENMOLDADO DE LA PLACA.	79
<b>III.8</b>	<b>CAMPAÑA EXPERIMENTAL.</b>	<b>80</b>
III.8.1	ESTUDIO DE LA MATRIZ	80
III.8.2	DURABILIDAD DE LAS FIBRAS EN CAC.	91
<b>PREPARACIÓN DE LA MATRIZ LÍQUIDA</b>		<b>92</b>
III.8.3	PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE LAS PLACAS.	95
III.8.4	COMPARATIVA ENTRE LAS PROBETAS REFORZADAS CON FIELTRO DE FIBRA VEGETAL Y LAS REFORZADAS CON FIBRAS SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO.	101
III.8.5	ENSAYO DE CONDICIONES REALES.	101
CAPÍTULO 4		102
IV. RESULTADOS		103
IV.1.1	ESTUDIO DE LA MATRIZ	103
IV.1.2	DURABILIDAD DE LAS FIBRAS EN EL CAC.	116
IV.1.3	PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE LAS PLACAS.	124
IV.1.4	COMPARATIVA DE PROBETAS REFORZADAS CON FIELTRO DE FIBRA VEGETAL Y CON FIBRAS SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO.	133
BIBLIOGRAFÍA		139

## Índice de tablas

Tabla II-1 Resistencias alcanzadas por los hormigones de CAC a diferentes temperaturas de curado. Fuente: S. Chinchón y M. Sanjuán, El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados.2008. ....	36
Tabla II-2 Especificaciones mecánicas y físicas del CAC (AENOR 2006).....	37
Tabla II-3 Especificaciones químicas del CAC (AENOR 2006).....	37
Tabla II-4 Composición del óxido de cemento. Fuente: S. Chinchón and M. Sanjuán, El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados. 2008 .....	38
Tabla II-5 Reacciones de hidratación de aluminatos de calcio (CA y C12A7).....	40
Tabla II-6 Parámetros y densidades de hidratos de aluminato de calcio. Fuente: Scrivener y capmàs. ....	40
Tabla II-7 Propiedades físicas y químicas del Metacaolín (MK). * Valores correspondientes al material con d50 = 5 micras. Fuente: propia elaborada a partir de ficha del producto.....	42
Tabla II-8 Composición porcentual de algunas fibras vegetales .....	47
Tabla II-9 Porcentajes de fibras utilizadas por investigadores que han trabajado con fibras vegetales Fuente: J. Claramunt et al 2015. ....	52
Tabla III-1 Normativas aplicables a los ensayos realizados. Fuente: Elaboración propia	71
Tabla III-2 Composición química del CAC y Metacaolín. Fuente: Elaboración propia..	71
Tabla III-3 Propiedades del fieltro de fibra de lino. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla III-4 Dosificaciones para el ensayo rendimiento mecánico. Fuente: Elaboración propia .....	76
Tabla III-5 Dosificación de la pasta de la matriz. Fuente: Elaboración propia.....	78
Tabla III-6 Dosificaciones empleadas para la determinación del pH. Fuente: Elaboración propia. ....	81
Tabla III-7 Dosificaciones empleadas para el ensayo de Microdureza Vickers. Fuente: Elaboración propia. ....	83
Tabla III-8 Composición porcentual dosificaciones. Fuente: Elaboración propia.....	86
Tabla III-9 Dosificaciones estudiadas en la microscopía electrónica de barrido BSEM. Fuente: Elaboración propia. ....	89
Tabla III-10 Parámetros para pavimentos. Fuente EN 1339:2003.....	100
Tabla IV-1 Resumen resultados del ensayo Vicat. Fuente: Elaboración propia. ....	106
Tabla IV-2 Relación de peso hielo-deshielo.....	130
Tabla IV-3 Valores de prueba de abrasión.....	132
Tabla IV-4 Relación agua cemento final, para fibras vegetales y fibras sintéticas.....	133

Figura I-1 Tipos de Asbesto: 1) Fibra de crisotilo, 2) Fibra de amosita, 3) Fibra de crocidolita. Fuente: K. Abú-Shams and I. Pascal, "Características, propiedades, patogenicidad y fuentes de exposición del asbesto," Anales del Sistema Sanitario de Navarra, vol. 28, no. SUPPL. 1. pp. 7–11, 2005. ....	20
Figura I-2 Retrato del ingeniero Ludwing Hastchek, 1901. Fuente: <a href="https://blog.laminasyaceros.com/blog/qui%C3%A9n-creo-el-fibro cemento">https://blog.laminasyaceros.com/blog/qui%C3%A9n-creo-el-fibro cemento</a> .....	21
Figura I-3 Eternit 1904. Fuente: <a href="http://www.bioeconomic.es/Ponencias/5LEED/201802_Presentaci_n_BioEconomic_EQUITONE_comp.pdf">http://www.bioeconomic.es/Ponencias/5LEED/201802_Presentaci_n_BioEconomic_EQUITONE_comp.pdf</a> .....	23
Figura I-4 Etiqueta según R. D. 1406/1989. Fuente: <a href="http://egcperu.com/sin-categoria/se-reglamenta-prohibicion-uso-de-asbesto/">http://egcperu.com/sin-categoria/se-reglamenta-prohibicion-uso-de-asbesto/</a> .....	30
Figura II-1 Desarrollo esquemático de la resistencia de los cementos de aluminato de calcio en una proporción de cemento/agua de aproximadamente 0.4. Fuente: Scrivener y Capmas .....	39
Figura II-2 Clasificación de las fibras según su origen: Fuente: Elaboración propia. ....	43
Figura II-3 Fibras naturales y fuentes de fibras naturales. ....	44
Figura II-4 Clasificación de las fibras por su forma y método de aplicación dentro de un compuesto. Fuente: Elaboración propia. ....	45
Figura II-5 Estructura de la fibra vegetal. Fuente: Elaboración propia. ....	47
Figura II-6 Tipos de refuerzos de fibras (a) continuas y alineadas, (b) discontinuas y alineadas, y (c) orientadas al azar. [96]) .....	53
Figura II-7 Curvas deformación esfuerzo para los compuestos reforzados con las estructuras no tejidas comparadas con las reforzadas con pulpa. Fuente: Claramunt, J. [et al.]. Estructuras no tejidas de fibras naturales como refuerzo para compuestos de cemento de elevada ductilidad. A: Congreso Nacional de Materiales Compuestos. "Actas del X Congreso Nacional de Materiales Compuestos celebrado en Algeciras el 2,3,4 y 5 de julio de 2013". Algeciras: 2013, p. 317-321. ....	54
Figura II-8 Clasificación de los materiales compuestos. Fuente: Adaptación ([9], [96]) ..	55
Figura II-9 Micrografías de encogimiento de la fibra. Fuente: Claramunt, J., et al. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. Carbohydrate Polymers (2009), doi:10.1016/j.carbpol.2009.07.057 .....	57
Figura II-10 Diagrama esquemático de fibra seca y no seca. Fuente: WEISE .....	57
Figura II-11 Tamaño de fibra de fibras no secas, secas y rehumectadas Fuente: WEISE. ....	57
Figura II-12 Área de la pared de fibras no secas, secas y rehumectadas. Fuente: WEISE .....	58
Figura II-13 Micrografías de fibras húmedas. Fuente: WEISE .....	58
Figura II-14 Desprendimiento de fibras de la matriz. Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., Perron, H., Ventura, H., & Manich, A. M. (2014, June). Effects of drying and rewetting cycles on the water absorption of vegetable fibres for composite reinforcement. Congress for Biobased Materials, Natural Fibres and WPC .....	60
Figura II-15 Fibra inmersa en cemento portland después de 5 ciclos seco-húmedo. Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Construction and Building Materials, 79, 115–128. <a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035</a> .....	60
Figura II-16 Descomposición en un medio alcalino. Fuente: Elaboración propia. ....	60
Figura II-17 Proceso de migración del hidróxido de calcio a la matriz de las fibras .....	62

Figura II-18 Micrografía SEM de una fibra pulpa de Kraft, muestra la presencia de los compuestos de hidratación del cemento. Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J. A. J. A., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. <i>Cellulose</i> , 18(2), 281–289. <a href="https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3">https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3</a> .....	63
Figura II-19 Microfotografía óptica de una fibra vegetal con depósitos de material en el lumen después de su exposición de 4 meses con cemento. (X400). Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J. A. J. A., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. <i>Cellulose</i> , 18(2), 281–289. <a href="https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3">https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3</a> .....	63
figura II-20 Mapa de puntos de elementos químicos en la interfaz de fibra de coco-mortero. Fuente: foto Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 22(2), 127–143. <a href="https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6">https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6</a> .....	64
Figura III-1 Organización de la campaña experimental. Fuente: Elaboración propia. ...	69
Figura III-2 Equipo de fabricación del fieltro. Fuente: Elaboración propia. ....	73
Figura III-3 Proceso de cornificación de la fibra; (a) fieltro cortado 32cmx32cm (b) fieltro en papel de filtro (c) fieltro con un ciclo de secado (d) estufa (e) fieltro cornificado (f)segundo ciclo de lavado del fieltro (g) primer ciclo de lavado (h) marcado en el rollo de fieltro(i) quinto ciclo de lavado. Fuente: Elaboración propia. ....	74
Figura III-4 Molde para probetas de caracterización de la matriz. Fuente: UNE-196-1...	76
Figura III-5 Elementos para las probetas a) Moldes de hierro utilizado para la fabricación de las probetas. b) moldes con probetas c) probetas identificadas. ....	77
Figura III-6 Adaptación del sistema Hastcheck. Esquema de composición para elaboración del pane Fuente: A. LLerena.....	77
Figura III-7 Preparación de las muestras compuestas. (a), (b) y (c) Pesaje de materiales de partida. (d) placa de metacrilato extruido (e) Mezcladora con materiales (f)Rodillo y fieltro ya cornificado (g) fieltro impregnado en pasta de cemento (h) Molde listo para comprimir y extraer exceso de agua (i) Molde listo para verter y armar el panel (j) molde con primera capa de pasta de cemento (k) placa lista para introducir a la cámara de curado (l)Molde listo para comprimir por 24 horas.Fuente: Elaboración propia. ....	80
figura III-8 Equipos para las pruebas de medidas de pH. (a) composiciones a ensayar (b) pHmetro (c) toma de medida a composición. ....	82
Figura III-9 Materiales y elementos para ensayo: a) composiciones, b) pHmetro Cricson, c) toma de medida de ph a muestra. Fuente: Elaboración propia. ....	83
Figura III-10 Indentador piramidal Vickers. ....	83
Figura III-11 Herramientas utilizadas para realización el ensayo de tiempo de fraguado (a) pantalla con medidas tomadas (b) probeta (c) aparato vicatronic (d)compactador manual (e) molde (f) pesaje de material. Fuente: Elaboración propia. ....	85
Figura III-12 Equipamiento para las pruebas a) cámara de vacío (b)embudo (c) compresor (d)mortero. Fuente: Elaboración propia. ....	89
Figura III-13 Componentes de las prueba (a)muestras cortadas (b)Sierra (c)máquina de pulido automático (d)microscopio electrónico de barrido SEM e) molde de silicona 30mmx30mm (f) probetas encapsuladas en resina epoxi. Fuente: Elaboración propia.	90
Figura III-14 Fibra lista para ensayar en el textuómetro. Fuente: X Lozano 2017. ....	94

Figura III-15 Preparación de fibras para ser observadas por microscopía electrónica. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura III-16 Esquema de marcado para el cortado de la placa previo a su ensayo mecánico. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura III-17 Cámara climática para someter las probetas a ciclos de envejecimiento acelerado. Fuente: Elaboración propia. ....	96
Figura III-18 Proceso del ensayo: (a) cámara climática (b) estructura para soporte de bandejas dentro de la cámara climática (c) probeta congelada (d) bandeja (e) montaje de probetas. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura III-19 Foto III 16 Probeta en lecho de arena lista para ensayar. Fuente: Elaboración propia. ....	98
Figura III-20 Probeta ensayada con muestra de impacto. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura III-21 Esquema de probeta a ensayar. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura III-22 Sierra para cortar las probetas. ....	100
Figura IV-1 Resultados obtenidos en la prueba pH. Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura IV-2 Microdureza Vickers. Fuente: Elaboración propia.....	105
Figura IV-3 Tiempo de fraguado del ensayo vicat. Fuente: Elaboración propia. ....	107
Figura IV-4 Tiempo inicial y final de fraguado del ensayo vicat Fuente: Elaboración propia.. ....	107
Figura IV-5 Gráficos de Resistencia mecánica a flexión 7, 28 y 56 días: a) MOR, b) MOE. Las tablas inferiores corresponden a la agrupación de categoría según Tukey. ....	108
Figura IV-6 Gráficos de Resistencia mecánica a compresión 7, 28 y 56 días: c) MOR, d) MOE. Las tablas inferiores corresponden a la agrupación de categoría según Tukey.	109
Figura IV-7 Espectros DRX para las diferentes matrices basadas en CAC con contenido entre 0-50% de metacaolín (MK) después del curado durante 28 días (a) y durante 56 días (b).....	112
Figura IV-8 (a) Micrografía BSE-SEM de la pasta 0MK después de 28 días que muestra partículas polifásicas anhidras y zonas hidratadas de C3AH6 + AH3 (b) Micrografía BSE-SEM que muestra las áreas para el análisis EDS y (c) espectros EDS correspondientes a SP1 = fase anhidra; SP2 y SP3 = fases anhidras con alto contenido de hierro Ferro-CT; y SP4 = AFm FASE HIDRATADA. Fuente: Elaboración propia. ....	114
Figura IV-9 (a) Micrografía BSE-SEM de la pasta 50MK después de 28 días que muestra partículas polifásicas anhidras, partículas de metacaolín sin reaccionar (marcadas con flechas rojas) y zonas hidratadas de C3AH6 + AH3. (b) Micrografía BSE-SEM que muestra las áreas para el análisis EDS y el área para una micrografía detallada presentada en la Figura (marcada en amarillo). (c) Espectros de EDS correspondientes a: SP1 y SP4 = metacaolín; SP2 = CA fase anhidra; y SP3 = Ferro-CT de fases anhidras con alto contenido de Fe Ferro-CT. Fuente: Elaboración propia.....	115
Figura IV-10 BSE-SEM que muestra un detalle de la partícula de Metacaolín en la Figura xb e imágenes de mapeo EDS de los elementos de la composición principal (Si, Al y O) en ausencia de calcio (Ca). Fuente: Elaboración propia. ....	116
Figura IV-11 Diagrama de caja para la resistencia de los fieltro después de 5 (a) y 10 (b) ciclos de inmersión en las diferentes pastas de cemento. Las cajas contienen los valores extremos del 50% de las muestras. Los puntos marcados como x corresponden a los valores medios. La línea punteada indica el valor promedio de la muestra de control. ....	117
Figura IV-12 Micrografías control fibra fieltro. ....	118
Figura IV-13 Micrografía CP 5 ciclos .....	118



Figura IV-14 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (d5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (10%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (d10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (10%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie. ....	119
Figura IV-15 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (e5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (20%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (e10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (20%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie. ....	120
Figura IV-16 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (f5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (30%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (f10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (30%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie. ....	121
Figura IV-17 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (g5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (40%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (g10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (40%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie. ....	122
Figura IV-18 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (h5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (50%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (h10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (50%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie. ....	123
figura IV-19 Comportamiento de flexión de las muestras después de curar durante 28 días (a), y después de un envejecimiento acelerado adicional (b). ....	124
Figura IV-20 Resultados de caracterización mecánica de (a) LOP, (b) MOR, (c) MOE y (d) energía de fractura específica para los compuestos de matriz CAC y refuerzo de fieltro (NW) con contenidos crecientes de MK (de 0% a 50%) antes (no envejecido) y después de un envejecimiento acelerado (envejecido). Las tablas inferiores corresponden a la agrupación de categoría según Tukey. ....	126
Figura IV-21 Estado de la probeta con mayor fisura. ....	131

Figura IV-22 Relación hielo-deshielo de las composiciones .....	131
Figura IV-23 Probetas ensayadas.....	132
figura IV-24 Absorción de NW y de FP.....	133
Figura IV-25 Comparación de resistencia mecánica entre fibra vegetal y sintética antes y después de envejecida. ....	134
figura IV-26 Desgaste.....	135
Figura IV-27 Probetas en ambiente real.....	135

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

### 1.1. Historia del Fibrocemento

1.1.1 Afección del amianto a la salud

1.1.2 Prohibición del amianto

1.1.3 Alternativa vegetal sintética

### 1.2. Hipótesis

### 1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

1.3.2 Objetivos específicos

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Historia del fibrocemento

El nacimiento del fibrocemento<sup>1</sup> se remonta casi de manera simultánea al nacimiento del hormigón armado[1]. Estaba constituido por una pasta de cemento hidráulico y fibras de refuerzo conocidas con el nombre de asbesto o amianto.

El amianto o asbesto, ambos nombres genéricos de una familia de minerales fibrosos, conocidos especialmente por su alta resistencia al fuego, se clasifican en dos grandes grupos: grupo anfíboles (crocidolita, antofilia, tremoolita, amosita, y actinolita) y grupo serpentinas (crisotilo) [2].

- Grupo anfíboles (fibras rectas): amosita o asbesto marrón, crocidolita o asbesto azul, antofilita o asbesto amarillo, tremolita y actinolita. Se encuentran en Sudáfrica y Australia.

- Grupo serpentinas (fibras curvadas): el principal, crisotilo o amianto blanco. Se encuentran en: Canadá, Rusia, Rep. Antigua URRS, Zimbawe e Italia.

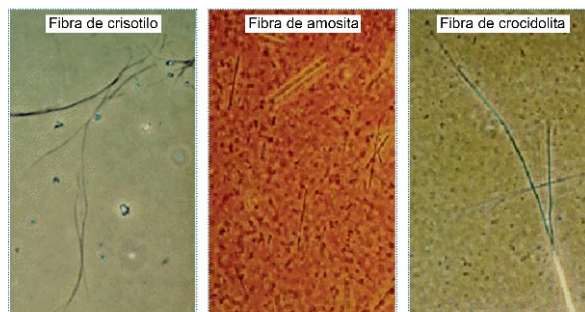


Figura I-1 Tipos de Asbesto: 1) Fibra de crisotilo, 2) Fibra de amosita, 3) Fibra de crocidolita. Fuente: K. Abú-Shams and I. Pascal, "Características, propiedades, patogenicidad y fuentes de exposición del asbesto," *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, vol. 28, no. SUPPL. 1. pp. 7-11, 2005.

El fibrocemento como tal, es un invento del ingeniero textil austriaco Ludwig Hastchek [3]. En 1893 funda la primera fábrica de asbestos Austro-húngara y comienza su experimentación en busca de nuevos productos. Durante 7 años trabajó en la elaboración de productos para revestimientos de cubiertas resistentes al fuego, y que fuesen ligeros, baratos y más duraderos.

<sup>1</sup> La UNE EN 12467:2013 tiene la siguiente definición para referirnos al fibrocemento. "Se entiende por cemento reforzado con fibras el producto cuyo componente

mayoritario es el cemento o aglomerantes hidráulicos. Las fibras de refuerzo pueden ser de uno o varios de los tipos siguientes: inorgánicos u orgánicos y sintéticos o naturales.



Figura I-2 Retrato del ingeniero Ludwig Hastchek, 1901. Fuente: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/qui%C3%A9n-creo-el-fibro cemento>

En el año 1900 se patentó una máquina que permite la incorporación de láminas de amianto de pocos milímetros de espesor en una pasta de cemento portland. La proporción utilizada era 9:1 (cemento-amianto), con la cual veía que tenía resultado como material de construcción[4].

En 1903 su fábrica ya producía varios tipos de planchas para cubiertas, entre ellas planchas corrugadas con cargo al grupo *Eternit*, posteriormente conocida como ETERNIT- Werke Ludwig Hastchek. En este

mismo año, llevan su producto a la Feria Habitacional de París, donde su material, al igual que el hormigón armado son los protagonistas.

En 1923 se crea la Sociétés Associés de Industries Amiante-Ciment (SAIAC), con sede en Suiza, cuyo objetivo principal era generar un espacio para el intercambio de conocimientos técnicos y experiencias, y además, ayudar con la adquisición de materias primas, regulación de los mercados, etc.[5]

Originalmente se utilizó el amianto<sup>2</sup> como fibra de partida para refuerzo. Durante la segunda guerra mundial la disponibilidad de amianto para usos no militares se redujo bastante, obligando a los fabricantes a estudiar el uso de otros posibles refuerzos.

En 1945 la empresa australiana de James Hardie and Coy Pty, Fibrolite<sup>3</sup>, hace la primera producción, sustituyendo un poco de mezcla de amianto y añadiendo celulosa (fibras naturales) en sus productos de fibrocementos.

<sup>2</sup> El asbesto o amianto está constituido por un grupo de minerales metamórficos fibrosos ampliamente extendidos en el mundo.

<sup>3</sup> Fibrolite: Fábrica australiana fundada en 1917 por un empresario escocés, quien conoció el fibrocemento en la Feria Habitacional de París.

La búsqueda de un reemplazo de las fibras de asbesto resultó en el examen de muchas fibras naturales en numerosos laboratorios de todo el mundo, así como por investigadores australianos.

En CSIRO<sup>4</sup> se estudió una amplia gama de fibras naturales (madera, bambú, plátano, lino, etc.), preparadas mediante diferentes métodos de fabricación de pulpa (química, mecánica y varias combinaciones) en varios sistemas de matriz (cementos, morteros, etc.) [3].

El 1947 la misma empresa, de la mano de los ingenieros Heath y Hackworthy, inicia una investigación para determinar la viabilidad de sustituir totalmente la fibra mineral por pulpa de papel. Los mejores resultados se obtuvieron con pasta de papel, fabricada siguiendo el método kraft, a pesar que en ningún caso consiguieron capacidades resistentes similares a las obtenidas con el amianto [6].

Durante los años 60 se inician nuevamente investigaciones sobre la sustitución del amianto por otros tipos de fibra. Uno de los

motivos que impulsó esta búsqueda fue la identificación de la fibra de amianto como principal causa del cáncer de pulmón de los trabajadores de las empresas fabricantes de productos de fibrocemento.

A principios de la década de 1970 se inició un esfuerzo global para legislar la eliminación del refuerzo de amianto de una amplia gama de productos (mobiliario urbano, cubiertas, etc.) [3].

En esta época se reconoce que, de todas las formas minerales del amianto, los anfíboles (la crocidolita o amianto azul y elamosita) son los productos más peligrosos para la salud e inmediatamente quedan prohibidos en la mayor parte de países del mundo. El primero de ellos fue Suiza en 1976, y en España fue prohibida en enero de 1987[7], [8].

Otra variante del amianto, el crisotilo o amianto blanco, continuó utilizándose en la fabricación de fibrocemento, pero su clasificación en los Estados Unidos como “producto cancerígeno de categoría 1” provocó que muchos países abandonaran

---

<sup>4</sup> La Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth es una agencia independiente del gobierno federal australiano responsable de la

investigación científica. Su función principal es mejorar el desempeño económico y social de la industria en beneficio de la comunidad.

definitivamente el uso del amianto como material de construcción. En España, la prohibición total de uso de este producto aconteció el 14 de diciembre del 2002.

En respuesta a la prohibición total en los países industrializados, las grandes empresas de fabricación de fibrocemento planteraron dos estrategias de subsistencia: por un lado, el traslado de la producción a países, mayoritariamente del tercer mundo, donde el amianto no está prohibido y; del otro, la sustitución del amianto por otras fibras de bajo coste aun cuando los productos obtenidos no sean tan resistentes.

El 1981 James Hardie y C (Commonwealth Science and Industry Research Organization), con sede a Australia, con base en unas investigaciones propias de 1978, lanzan al mercado los productos "Hardiflex II" libres de amianto y reforzados con fibras de celulosa refinada.

En 1982 el gobierno y la industria alemanes acordaron reducir el contenido de asbesto entre un 30 % y un 50 % antes de 1986, y en 1984 revisaron el acuerdo para establecer que todos los materiales de construcción de edificios estarían libres de amianto para 1990 [3].



Figura I-3 Eternit 1904.

Fuente: [http://www.bioeconomic.es/Ponencias/5LEED/201802\\_Presentaci\\_n\\_BioEconomic\\_EQUITONE\\_comp.pdf](http://www.bioeconomic.es/Ponencias/5LEED/201802_Presentaci_n_BioEconomic_EQUITONE_comp.pdf).

En Europa, la empresa británica Cape comercializa productos con un contenido de celulosa del 5 % junto con otros aditivos minerales. A/S Norcem (Noruega) y OY Partek OB (Finlandia) unen sus esfuerzos creando la empresa NOPA por producir un producto a base de cemento y celulosa denominado "Cellcem" [9].

Actualmente existen numerosas patentes de productos de construcción que utilizan fibras de madera o celulosa, son empresas como la Allura plycem, GAF Weatherside, Hardie Plank, Nichiha, Woodtone, American Fiber Cement, Finex, Equitone, American Fiber Cement Corporation (AFCC), entre otras [10]. Estas empresas, en particular realizan productos en su mayoría de revestimiento, paneles y tejas.

El aumento en la utilización de las fibras vegetales como refuerzo de morteros y hormigones no es fruto únicamente de la necesidad de sustituir el amianto, sino que hay dos aspectos más a considerar:

- *El aspecto medioambiental*

La construcción, para ser sostenible, ha de incorporar el mayor número posible de materiales reciclados a base de residuos o, como mínimo, de materiales renovables. En este sentido, las fibras de origen vegetal obtenidas de residuos agrícolas o de plantaciones controladas son una solución adecuada [8].

Además, la utilización de los residuos vegetales soluciona el problema de su destrucción, evitando la incineración en la propia plantación. Esta práctica es muy común sobre todo en los países subdesarrollados donde se utilizan las cenizas como abono para el año siguiente. El abono resultante no es equilibrado ya que se destruye la micro flora del suelo y se contamina el aire sin aprovechar la energía desprendida.

El sector de la construcción está asociado a la degradación del medio ambiente, en gran parte por los

materiales que se utilizan en esta industria. Con el fin de contrarrestar el impacto ambiental que genera el uso indiscriminado de los materiales de construcción, ha sido necesario desarrollar nuevos materiales que sean más respetuosos con nuestro entorno [11].

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo (se estima una producción anual de 1,5 m<sup>3</sup> por habitante del planeta [12], y tras el agua, es el producto más consumido en la tierra.

Cada año, la industria del hormigón emplea 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena y un billón de toneladas de agua. Cada tonelada de cemento, requiere 1.5 toneladas de roca caliza así como del consumo de combustibles fósiles [13].

En búsqueda de conseguir materiales más sostenibles, se ha retomado en los últimos años el estudio de las fibras vegetales como material de refuerzo.

Estas fibras son de gran interés no solo por tratarse de un recurso renovable,



sino por su bajo costo, siendo una opción factible especialmente para los países en vías de desarrollo, que disponen de ellas.

El sector cementero debe seguir incidiendo en las posibilidades de reciclado de los materiales fabricados con cemento, además de los utilizados propiamente en su fabricación, y, sobre todo, se debe seguir profundizando en la relación entre Ciclo de Vida y reciclaje, lo que proporcionará al sector una metodología y unas herramientas útiles para reducir el impacto ambiental, la huella de carbono, y reforzar sus contribuciones sociales y económicas [14].

La huella de carbono (HC) es un indicador de la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) generados y emitidos por una empresa o durante el ciclo de vida de un producto a lo largo de la cadena de producción, a veces incluyendo también su consumo, recuperación al final del ciclo y su eliminación [15].

Las definiciones existentes en la literatura se centran en el CO<sub>2</sub> como el principal eje de análisis, siendo la gran

diferencia entre estas, además del alcance de la huella, la inclusión de los demás gases de efecto invernadero. La propiedad a la que frecuentemente se refiere la huella de carbono es el peso en kilogramos o toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero, emitida por persona o actividad [16], [17].

Existe una serie de factores que hay que tomar en cuenta, y pueden ser optimizados para contribuir a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El uso de refuerzo de fibras vegetales representa una alternativa viable para disminuir la huella de carbono, y a su vez, una manera de reducir el impacto medioambiental que causan los residuos, así como se han ido estudiando otros posibles materiales, representando un avance hacia unos materiales de construcción más sostenible.

- *El aspecto social*

El aumento en la demanda de vivienda digna en los países en vías de desarrollo requiere soluciones alternativas a bajo coste.

En estos países el coste de la tecnología constructiva moderna es excesivo para la mayor parte de la población. Estos costes son consecuencia de tres factores básicos:

- La distancia entre las fuentes de energía y los centros de producción.
- La distancia entre los centros de producción y los lugares de consumo,
- La formación de monopolios económicos de materiales básicos de la construcción.

Entre los compromisos que plantea el desarrollo sostenible destaca como uno de los grandes problemas que actualmente enfrenta y vive la humanidad, especialmente en los países subdesarrollados: la vivienda, tanto en su forma cualitativa (nivel de vida) como cuantitativa (déficit habitacional), así también la construcción de pueblos y ciudades, que consume el 50 % de todos los recursos mundiales y genera gran cantidad de residuos [18].

En América latina el crecimiento desmesurado de las ciudades sin una

previsión a futuro, ha provocado un crecimiento desproporcionado, con asentamientos informales y hacinamientos en las periferias de las ciudades; generando barrios vulnerables, carentes de transporte público y servicios básicos.

Este tipo de prototipo de ciudad, que se repite en casi todos los países de América Latina, tiene una importante responsabilidad en el freno del desarrollo económico de la región [19].

Se pueden mencionar algunas estadísticas sobre vivienda en América Latina (AL) que han marcado las tendencias de las políticas de asistencia social [20]:

- El 40 de las familias no poseen viviendas adecuadas.
- El 22 % vive en habitaciones que requieren mejoras, y el 18 % necesita casa nueva.
- Según el Relator Especial de Vivienda para Hábitat ONU, entre los años 1990 y 2000, el déficit de vivienda en América Latina aumentó de 32 a 52 millones de viviendas. Este es en parte causado por la disminución del gasto público

en vivienda social en ciertos países de la región.

- Hay 127 millones de personas viviendo en asentamientos informales.
  - Los incrementos de valor de la tierra asociados a procesos informales de ocupación de suelo generan aumentos de precio que varían de un 50 % a un 110 %.
  - Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), para 2030 la región tendrá aproximadamente 609 millones de habitantes, con una tasa de urbanización superior al 80 %.
- [20]

La edificación convencional se centra en el uso del hormigón, echando a un lado los materiales más amigables al medio ambiente que se han venido usando por los antiguos pobladores y que son más asequibles muchas veces por la clase baja, siendo en ocasiones este tipo de arquitectura tradicional considerada sinónimo de pobreza.

Otras edificaciones aún conservan lo tradicional; su estructura de madera, ya sea la que está disponible en la

zona, en muchos casos tablas de palma, cubiertas inclinadas con techos de aluzinc, caña u otros materiales disponibles.

El problema de la falta de viviendas, así como los hacinamientos en los países de tercer mundo, es un tema muy discutido a nivel mundial [20]. A raíz de esto han surgido reglamentaciones y parámetros a seguir a la hora de construir viviendas, pero solo aplicables a las de carácter social y no teniendo una acogida positiva debido a la gran cantidad de variables que en estos intervienen.

La población en general tiene una idea muy básica del concepto de vivienda que limita a la posesión de la parcela y una estructura. Por lo tanto, si tiene esto, lo demás puede esperar. Es una idiosincrasia formada y derivada de la pobreza, este tipo de idiosincrasia debería ser objeto de tratamiento en la definición de una política integral de vivienda [21].

A comienzos del siglo XXI se cifró en 40 millones el número de familias urbanas que no contaban con ningún tipo de cobijo, los llamados "sin techo". Esta

cifra de déficit cuantitativo puede aumentarse entre dos y tres veces si se consideran las viviendas necesitadas de sustitución como consecuencia de desastres naturales, conflictos, desalojos forzados y desplazamientos internos.

Según las Naciones Unidas, para alojar a los nuevos hogares que se formarán se requerirán unos 22 millones de viviendas anuales en los tres primeros lustros del siglo antes mencionado y 27 millones anuales en los siguientes 15 años [22].

En muchos países en desarrollo y economías emergentes, el Banco Mundial y otras instituciones financieras internacionales y regionales continúan promoviendo activamente la financiarización de la vivienda como principal estrategia para hacer frente a la necesidad crítica de vivienda, a pesar de las pruebas de que esas estrategias no ofrecen opciones de vivienda a los hogares más necesitados, y dan lugar a una mayor desigualdad socioeconómica [23].

Algunos Gobiernos han optado por fomentar un enfoque más inclusivo de

la inversión privada en la vivienda mediante incentivos financieros para alentar la construcción de viviendas asequibles.

Utilizar fibras residuales vegetales como materia prima para la fabricación de materiales de construcción en los propios lugares de consumo, permite reducir costes en el transporte y eliminar la formación de monopolios sobre este material [24].

### **I.1.1 Afección del amianto a la salud**

Las fibras de amianto debido a sus características aerodinámicas, forma alargada y pequeño tamaño, no son detectables a la vista. Al menos 12.000 litros de aire son filtrados por los pulmones de un ser humano en un día [25], con este aire las fibras pueden ser absorbidas con facilidad sin ser frenadas por el sistema mucociliar, representando un riesgo respiratorio y derivando un sinnúmero de enfermedades.

Cuando fueron evidentes sus afecciones sobre la salud, menos agresivos (fibrosis pulmonar o asbestosis; derrame, placas y engrosamiento pleurales) como mas agresivos (mesotelioma, cáncer de

pulmón y otros tipos de cáncer), se acrecentó el interés común por una regulación de la utilización del amianto [26].

El primer caso bien documentado de asbestosis (fibrosis pulmonar por exposición a asbesto) diagnosticado por Murray en el Reino Unido, se publicó en 1906. Correspondía a un empleado de la industria textil que trabajaba en un taller de cardado y era el único superviviente de los 11 trabajadores que habían comenzado en ese taller [27].

En España la asbestosis y los cánceres de pulmón y pleura asociados a exposición al asbesto, figuran en el cuadro de enfermedades profesionales recogido en el Real Decreto 1995/1978 de 12 de mayo. Una primera prohibición del tipo anfíbol de amianto se da en 1989, mientras que bajo la Orden Ministerial del 07 de diciembre del 2001, queda totalmente prohibido su uso [28][22].

De 1990 a 2001 en España, el sector del fibrocemento acumuló 189 casos de asbestosis, el naval 173, la construcción 49 y la metalurgia 35. Por ocupación, los operadores de máquinas fijas presentaron 114 casos, los moldeadores, soldadores,

chapistas y montadores de estructuras metálicas 88 casos, y los pintores, fontaneros e instaladores de tuberías 59. Las Comunidades Autónomas con más casos fueron la Valenciana (106), Galicia (86), Andalucía (82), Cataluña (75), Madrid (58) y País Vasco (41) [29].

### **I.1.2 Prohibición del amianto**

En 1978 una resolución del Parlamento Europeo[30] declaró al asbesto sustancia cancerígena. Las variedades más perjudiciales para la salud, Crocidolita (el asbesto azul) y la Amosita (el asbesto marrón) fueron prohibidas en España en 1984 y 1993, respectivamente[31].

En 1999 en virtud de una Directiva de la Unión Europea, se prohibió la comercialización y el uso de cualquier tipo de asbesto. En diciembre de 2001 España se adelantó al plazo máximo previsto por la UE y prohibía la comercialización y utilización de crisotilo (asbesto blanco); el único tipo que todavía seguía siendo utilizado en España mediante la Orden Ministerial de 7 de diciembre de 2001[31].

El 15 de junio de 2002 entró en vigor en España la prohibición de fabricar productos que contengan asbesto. Hasta el 15 de diciembre de ese mismo año se

podían comercializar e instalar productos con asbesto fabricados antes del 15 de junio de 2002. La legislación española sobre el asbesto está desarrollada por el Real Decreto 396/2006 de 31 de marzo. En este se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a los trabajos con riesgo de exposición al asbesto[28], [31], [32].

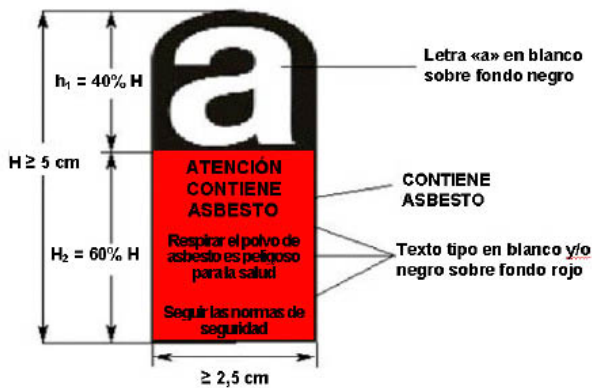


figura I-4 Etiqueta según R. D. 1406/1989. Fuente: <http://egcperu.com/sin-categoria/se-reglamenta-prohibicion-uso-de-asbesto/>

En el 2006 se regularon las disposiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a los trabajos con riesgo de exposición al amianto [29]. Estos trabajos comprenden fundamentalmente la retirada del amianto instalado, los trabajos de mantenimiento y reparación sobre materiales que contienen amianto, y las actividades de transporte, tratamiento y/o destrucción de residuos.

En respuesta a la prohibición total en los países industrializados.

Las grandes empresas de fabricación de fibrocemento han planteado dos estrategias de subsistencia: por un lado, el traslado de la producción a países, mayoritariamente del tercer mundo, donde el amianto no está prohibido y, del otro, la sustitución del amianto por otras fibras de bajo coste aun cuando los productos obtenidos no sean tan resistentes.

Luego de prohibiciones parciales de algunos tipos de amianto, restricciones en ciertos usos, etc., finalmente, la Directiva 1999/77/CE de la Comisión de 26 de julio de 1999, reunida en Bruselas, prohíbe la "utilización del amianto y productos que lo contengan", publicando su resolución en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas el 06/08/1999 [24].

Una de las razones por las cuales la fibras vegetales hoy en día son de las alternativas mas eficaces es por el interes de sustutuir el amianto.

### I.1.3 Alternativa vegetal-sintética

La sostenibilidad basada en el reciclaje, la disponibilidad en el medio, el bajo consumo de energía y las bajas emisiones de CO<sub>2</sub> en los procesos constructivos enfocados a la obtención de un producto que sea amigable con el medio ambiente, y por ende de bajo impacto, son tomados en cuenta hoy en día en el sector de la construcción [33].

Desde que las fibras de asbestos fueron diagnosticadas como peligrosas para la salud [35][36], se inició la búsqueda de otras fibras como nuevas alternativas[36] que le proporcionaran al mortero las mismas propiedades que las fibras de asbestos le daban.

Las primeras alternativas fueron las fibras vegetales hasta que alguien encontro fibra sinteticas que funcionaran.

La elección de la fibra de pulpa de madera como el sustituto preferido para el asbestos en el cemento de fibra no fue una conclusión determinante. Debe recordarse que durante la década de 1970 el cemento reforzado con fibra de vidrio fue aclamado como la principal alternativa al cemento reforzado con amianto [37]. También las fibras de acero,

una amplia gama de fibras poliméricas sintéticas, así como otras fibras naturales, se investigaron activamente en varios países del mundo [3], [38] .

Las fibras sintéticas como el polipropileno (PP) y el alcohol polivinilo (PVA) son resistentes al álcali y se utilizan comúnmente como refuerzo principal en compuestos a base de cemento. Sin embargo, la producción de fibras sintéticas consume una gran cantidad de energía, como es el caso de las fibras de polipropileno que requiere aproximadamente 38 kJ/kg y materias primas químicas y petroquímicas [39].

Gran parte de la investigación llevada a cabo por CSIRO a principios de la década de 1980 se dirigió a proporcionar un refuerzo de fibra natural más económico que los de fibras de madera blanda refinada de *kraft* [40] (relativamente caras), que utiliza la industria australiana.

Al mismo tiempo hubo un interés considerable en explicar la manera en que las fibras se unían a la matriz de cemento, y el comportamiento de desempeño de estos nuevos materiales reforzados con fibra de madera bajo

carga y bajo diferentes condiciones climáticas.

Desafortunadamente, a pesar de que millones de dólares se han dedicado a esta área de investigación en forma de ayuda externa, la tasa de éxito de tales actividades ha sido limitada debido a la falla del producto [41]. Sin embargo, se están realizando esfuerzos para controlar el rendimiento de los materiales de construcción de bajo costo para su uso en los países en desarrollo [3].

En 1987 Gambia fue el primer país de África en adoptar regulaciones que apoyan el uso de materiales de construcción autóctonos y de bajo costo, adecuados a las necesidades y capacidades financieras de los habitantes [3], [42].

Sigue existiendo una gran necesidad de estudiar nuevos métodos más baratos de producción de fibra, procesos de producción de bajo costo, y la cuestión más importante de la durabilidad.

La durabilidad [3], [43]–[45] está relacionada con las formulaciones matriciales, los métodos de procesamiento y los regímenes de

curado, y si los productos de cemento reforzados con fibra natural están disponibles para viviendas de bajo costo. Aún queda mucho por investigar.

La producción industrial de compuestos a base de cemento reforzados con fibras vegetales está actualmente limitada por la falta de durabilidad de estos materiales[46]–[48][8].

## 1.2 HIPÓTESIS

La durabilidad es un problema latente en el tema de los compuestos cementicios reforzados con fibras vegetales. Actualmente las fibras vegetales mejoran la ductilidad, flexibilidad y la resistencia a la rotura en el material resultante[49], pero es muy visto que en temas de producción industrial está siendo limitado su uso debido a la falta de durabilidad, por lo tanto, se estudian posibles maneras de solucionar este problema, como: tratamientos a las fibras, y modificaciones de matriz con puzolanas, entre otros y/o en su refuerzo (fibras vegetales) [39], [47], [50]–[55].

Esta investigación parte de la hipótesis de que una de las maneras de conseguir durabilidad en los compuestos



cementicios armados con fibras vegetales puede ser el uso de cementos alternativos al cemento portland, es por ello que utilizaremos el Cemento Aluminato de Calcio como base de esta investigación.

### **I.3 OBJETIVOS**

#### **I.3.1 Objetivo General**

Estudiar la viabilidad de un material compuesto de matriz a base de CAC y refuerzo mediante fieltro de fibras vegetales, para su aplicación como material de construcción para interiores y exteriores. Además, se ha buscado una posible utilización como pavimento para espacios públicos. Una parte importante del estudio será de la durabilidad tanto a nivel de compatibilidad de los materiales como de mantenimiento de las propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.

##### **I.3.1.1 Objetivos específicos**

Con el fin de conseguir el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- *Estudiar las propiedades físico-mecánicas de CAC.*

- *Estudiar las propiedades físico-mecánicas de las fibras vegetales.*
- *Estudiar las propiedades físico-mecánicas del material compuesto.*
- *Estudiar el tratamiento de las fibras para mejorar la durabilidad del compuesto.*
- *Comprobar la influencia del tratamiento de las fibras vegetales en la durabilidad del compuesto.*
- *Proponer un pavimento con características diferenciales y mejoradas respecto a los pavimentos convencionales de cemento Portland.*
- *Estudiar el comportamiento del producto sometido a los diferentes estudios requerido para su aplicación, tanto de envejecimiento acelerado mediante ciclos seco-húmedos, ciclos de hielo deshielo y abrasión al desgaste entre otros realizados durante la campaña experimental.*
- *Colocar la propuesta de prototipo ensayado en ambiente real.*

## CAPÍTULO 2

### 2. Estado del arte

#### 2.1 Cemento

##### 2.1.1 CAC

2.1.1.1 Composición del CAC

2.1.1.2 Hidratación del CAC

2.1.1.3 Reacción de hidratación CAC

##### 2.1.2 Metacaolín

##### 2.1.3 Fibras

2.1.3.1 Tipos de fibras

2.1.3.2 Fibras vegetales

2.1.3.2.1 Estructura de la fibra  
vegetal

2.1.3.2.2 Filtro de fibra vegetal

2.1.3.2.3 Fibras de lino

2.1.3.2.3.1 Filtro de fibra vegetal  
de lino

#### 2.2 Material compuesto

2.2.1 Características de los elementos

#### 2.3 Comportamiento de la matriz vegetal en la matriz cementicea

2.3.1 Variación de volumen

2.3.2 Degradación del material  
compuesto con los ciclos secos

2.3.3 Mecanismo de transporte

#### 2.4 Estrategias de mejora de la durabilidad

2.4.1 Fibras

2.4.2 Matriz

## II. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Cemento

Se definen como cementos los conglomerantes hidráulicos que, convenientemente amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo agua [56].

#### 2.1.1. Cemento aluminato de Calcio (CAC)

El cemento de aluminato de calcio (CAC), anteriormente denominado como cemento aluminoso (AC), es un conglomerante hidráulico que resulta de la molienda y cocción hasta la fusión de una mezcla de alúmina, cal, óxidos de hierro y sílice, logrando que el cemento obtenido contenga como mínimo un 30 % de alúmina [57].

De acuerdo a la norma UNE-EN 14647:2006, el Cemento de Aluminato de Calcio deberá ser identificado como Cemento de aluminato de calcio EN 14647 CAC.

Las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento aluminato de calcio son la caliza y bauxita (rica en alúmina). Para la producción de Clinker de CAC se utilizan distintos procesos; fusión en atmósfera reductora, fusión simple, o simple clinkerización, utilizando para todo esto hornos de cubilote, de reverbero o rotatorios.

Actualmente los procesos más económicos utilizan hornos de reverbero para la obtención de CAC de contenidos medios y bajos en alúmina (40 % - 55 % de  $Al_2O_3$ ), y hornos rotatorios para la obtención de CAC de alto contenido en alúmina (70 % de  $Al_2O_3$ ) [58].

Después de un enfriamiento lento, el clinker es triturado hasta la finura requerida sin añadirle ninguna adición, en contra de lo que sucede con el cemento Portland (CP) al cual se añade yeso para retardar el fraguado.

En comparación con las pastas de CP, las que han sido confeccionadas con CAC tienen mejor comportamiento a temperaturas elevadas, poseen una mayor durabilidad frente al ataque de ácidos y sulfatos, y desarrolla su resistencia mucho más rápido [59].

El CAC que en España se conoció y se conoce todavía hoy con el nombre de Cemento Aluminoso, se utilizó masivamente entre los años 1950-1970 en la fabricación de prefabricados estructurales de hormigón pretensado y armado [59].

Algunas propiedades que presentan los CAC son [60], [61]:

- *Rápido endurecido.*
- *Resistencia al calor (propiedades refractarias).*
- *Resistencia química.*
- *Resistencia al desgaste.*
- *Alta resistencia a la compresión.*

Una importante propiedad del CAC es el desarrollo rápido de resistencias. No es infrecuente que los hormigones de CAC a 20 °C alcancen resistencias superiores a 40 MPa a las 6 horas, y 70 MPa a las 24 horas. El desarrollo de resistencias está fuertemente influenciado, como en el caso de los CP, por la relación agua/cemento. También está comprobado el efecto que tiene sobre el desarrollo de resistencias la temperatura a las primeras horas de curado.

En la Tabla II-1 se muestran las resistencias alcanzadas por los hormigones de CAC a diferentes temperaturas de curado; de

acuerdo con el autor del estudio, las probetas se curaron durante 4 horas a 18 °C en humedad ambiente y posteriormente se sumergieron 48 horas en agua [59].

Tabla II-1 Resistencias alcanzadas por los hormigones de CAC a diferentes temperaturas de curado. Fuente: S. Chincón y M. Sanjuán, *El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados*. 2008.

Relación Agua/Cemento	Temperatura de curado (°C)	Resistencia a compresión (MPa)
0,33	10	91
	20	90
	30	88
	50	68
	70	46,5
0,40	10	81,5
	20	77
	30	78
	50	55,5
	70	34,5
0,50	10	70
	20	72
	30	67,5
	50	32
	70	22
0,67	10	60,5
	20	55
	30	50
	50	24
	70	9

Tabla II-2 Especificaciones mecánicas y físicas del CAC (AENOR 2006).

Resistencia a compresión (N/mm <sup>2</sup> )		Inicio de los tiempos de hidratación (min)
A las 6 horas ≥ 20	A las 24 horas ≥ 40	≥ 60

Tabla II-3 Especificaciones químicas del CAC (AENOR 2006).

Propiedades	Método de referencia	Especificación (% en masa)
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	UNE-EN 196-2	36 ≤ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 55
Sulfuro (S <sub>2</sub> )	UNE-EN 196-2	≤ 0,10
Cloruro	UNE-EN 196-2	≤ 0,10
Alcalinas	UNE-EN 196-2	≤ 0,4
Sulfato (SO <sub>3</sub> )	UNE-EN 196-2	≤ 0,5

### II.1.1.1 Composición del CAC

Los CAC están disponibles en una variedad de composiciones que se clasifican según el contenido de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en cada elemento, pudiendo variar el contenido de 40 % a más del 80 % [62], y cal (CaO) con porcentajes superiores al 36 %. También tiene óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en cantidades inferiores al 20 %, además de componentes minoritarios como el SiO<sub>2</sub>, FeO, SO<sub>3</sub>, MgO y TiO<sub>2</sub> [59].

El CAC puede presentar diferentes composiciones químicas dependiendo de

su proceso de fabricación. En la Tabla II-2 se muestran diferentes grados de cemento aluminato de calcio CAC y un desglose típico de óxido para cada grado.

Estos presentan niveles relativamente altos de óxido de aluminio en comparación con otros cementos con bajos niveles de dióxido de silicio y óxido de calcio.

También se muestra un desglose típico de óxido de cemento para un cemento portland tipo I / II (CSC típico) y un cemento de sulfoaluminato de calcio (CSA), para comparar.

Uno de los puntos principales para utilizar el CAC en esta campaña además de su resistencia a altas temperaturas, es la característica de que no genera hidróxido cálcico, que es el compuesto hidratado reconocido por la bibliografía científica como causante de la pérdida de propiedades mecánicas de las fibras vegetales [63].

Tabla II-4 Composición del óxido de cemento. Fuente: S. Chinchón and M. Sanjuán, *El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados*. 2008

Tipo	Color	Rango de composición (%)							
		Óxido de aluminio Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de calcio CaO	Dióxido de silicio SiO <sub>2</sub>	Óxidos de hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	Óxido de titanio TiO <sub>2</sub>	Óxido de magnesio MgO	Óxido de sodio Na <sub>2</sub> O	Óxido de potasio K <sub>2</sub> O
Aluminio estándar bajo CAC	Gris o beige a negro	36-42	36-42	3 - 8	<2	<2	~1	~0.3	~0.15
Bajo aluminio bajo en hierro CAC	Beige claro o gris a blanco	48-60	36-42	3 - 8	<2	<2	~0.1	~0.1	~0.05
Aluminio medio CAC	Blanco	65-75	25-35	<0.5	<0.5	<0.05	~0.1	<0.3	-0.05
Aluminio alto CAC	Blanco	≥80	<20	<0.2	<0.2	<0.05	<0.1	<0.2	-0.05
Tipo I/II Portland Cemento Calcio	Gris	5	63	20	3.5	0.2	0.9	0.3	0.3
cemento sulfoaluminato	Blanco	14	52	12	1	0.9	2	0.01	0.9

### II.1.1.2 Hidratación del CAC (cemento de aluminato de calcio)

La hidratación de los sistemas CAC se ha estudiado ampliamente desde que el material se produjo originalmente [62] hasta la actualidad.

A diferencia de la hidratación de los compuestos de silicato de calcio, en los cuales los hidratos formados permanecen en general similares con el tiempo y temperaturas de hasta aproximadamente

100 °C, el proceso de hidratación en los cementos de aluminato de calcio depende en gran medida de la temperatura [64].

Según Adams et al. [62] el CAC se hidrata formando cuatro fases principales: CAH<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> y AH<sub>3</sub>. Estos hidratos se dividen en dos categorías principales, metaestables (CAH<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>) e hidratos estables (C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> y AH<sub>3</sub>).

Cabe destacar que la fase  $C_3AH_6$  tiene la mayor densidad de hidratos de aluminato de calcio, lo que provoca una mayor porosidad en grado de hidratación.

El hidrato que se forma inicialmente depende del historial de temperatura del sistema y de la humedad [65];

- A bajas temperaturas;  $CAH_{10}$ , es el primer hidrato formado.
- A temperatura intermedia, se forman;  $C_2AH_8$  y  $AH_3$ .
- A temperaturas más altas;  $C_3AH_6$  y  $AH_3$ .

La reacción de las fases metaestables a las fases estables se conoce como "conversión". A temperatura ambiente los hidratos metaestables pueden persistir durante muchos años, pero existe una fuerza termodinámica inevitable para la conversión a los hidratos estables[66].

También se ha sugerido que la conversión directa de  $CAH_{10}$  a  $C_3AH_6$  puede ocurrir a través de una reacción de estado sólido [62]. Sin embargo, Scrivener [67] señala que esto no es posible y que las similitudes entre las estructuras cristalinas de  $C_2AH_8$  y  $C_3AH_6$  indican que  $C_2AH_8$  siempre es una

fase intermedia en la conversión de  $CAH_{10}$  a  $C_3AH_6$ .

Otro factor que se da en la reacción de conversión es la liberación de agua, y lo vemos reflejado en la Figura II-1 .

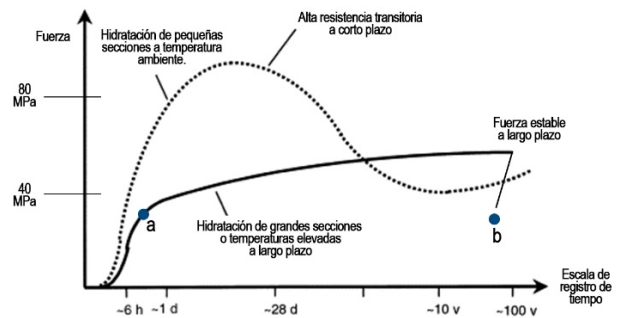


Figura II-1 Desarrollo esquemático de la resistencia de los cementos de aluminato de calcio en una proporción de cemento/agua de aproximadamente 0.4. Fuente: Scrivener y Capmas.

Otro factor de suma importancia que hay que tomar en cuenta en la hidratación del CAC es la relación a/c inicial utilizada. Tenerla controlada garantiza que a largo plazo la resistencia del producto cumpla y pueda dársele una correcta aplicación. Scrivener et al.[65] sugieren una relación a/c inicial igual o inferior a 0,4 y que en ausencia de superplastificante conlleve a un contenido de cemento de más de 400 kg/m<sup>3</sup>.

Se puede apreciar en la figura anterior que;

- En el punto a, la resistencia mínima se ha alcanzado en menos de 12 horas, por lo tanto, la reacción de conversión se producirá de manera instantánea, lo que conducirá a un desarrollo de resistencia en continuo aumento[65].
- En el punto b, luego de transcurridas varias conversiones, se vuelve a alcanzar una resistencia estable a largo plazo.

Algunas reacciones de hidratación de los aluminatos de calcio se dan en la Tabla II-5 Reacciones de hidratación de aluminatos de calcio (CA y C12A7).

Tabla II-5 Reacciones de hidratación de aluminatos de calcio (CA y C12A7).

$CA + 10H \rightarrow CAH_{10}$	(13.1)
$2CA + 11H \rightarrow C_2AH_8 + AH_3$	(13.2)
$3CA + 12H \rightarrow C_3AH_6 + 2AH$	(13.3)
$2CAH_{10} \rightarrow C_2AH_8 + AH_3 + 9H$	(13.4)
$3C_2AH_8 \rightarrow 2C_3AH_6 + AH_3 + 9H$	(13.5)

Las ecuaciones 13.1-13.5 muestran las posibles reacciones durante la hidratación del aluminato de monocalcio (CA) y las reacciones análogas que podrían escribirse para  $C_{12}A_7$ . Para CA a temperaturas inferiores a 10 °C predomina la formación de  $CAH_{10}$  (ecuación 13.1), esta fase continúa formándose hasta aproximadamente los 27 °C.

Entre 10 °C y 27 °C se pueden formar tanto  $CAH_{10}$  (ecuación 13.1) como  $C_2AH_8$  (ecuación 13.2)[66].

Tabla II-6 Parámetros y densidades de hidratos de aluminato de calcio. Fuente: Scrivener y capmàs.

	$CAH_{10}$ <sup>47</sup>	$C_2AH_8$ *	$C_3AH_6$	$C_4AH_{13}$ <sup>2</sup>	$C_2ASH_8$ <sup>2</sup>	$AH_3$ gibbsita
Sistema de cristal	Hexagonal	Hexagonal	Cúbico	Hexagonal	Hexagonal	Monoclínico
Celda unitaria o elemento estructural (nm)	a= 1.6381 c= 0.8317	a= 0.574 c= 1.07	a= 1.257	a= 0.5752 c= 0.794	a= 0.5747 c= 3.764	a= 0.864 b= 0.507 c= 0.972 β= 94.57*
Densidad (kg /m <sup>3</sup> )	1720	1950	2520	2046	1936	2400



A temperaturas altas ya no se forma  $CAH_{10}$  y la fase estable  $C_3AH_6$  ocurre temprano en el proceso de hidratación. Se ha afirmado que la formación de  $C_3AH_6$  siempre está precedida por la formación transitoria de algunos  $C_2AH_8$ , incluso a temperaturas de hasta  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero la formación directa de  $C_3AH_6$  a partir de CA (ecuación 13.3) puede tener lugar después que se haya nucleado algo de  $C_3AH_6$ . Esta fase se convierte rápidamente en el único hidrato presente cuando la hidratación ocurre a temperaturas superiores a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las ecuaciones 13.4 y 13.5 muestran la conversión de los hidratos metaestables. La velocidad de estas reacciones depende de la temperatura, el estado de humedad, y posiblemente, otras variables como la relación agua/cemento [61].

En cualquier caso la transformación de  $CAH_{10}$  a fases estables de  $C_3AH_6$  comporta una densificación de los cristales y un aumento de la porosidad tal como se puede demostrar a partir de la Tabla II-6.

## II.1.2 Metacaolín (MK)

En los últimos años ha crecido el interés por el uso de metacaolín (MK) como adición mineral, con el fin de mejorar la durabilidad y resistencia de los compuestos cementicios [68]. Sabir et al. [69] y Siddique y Klaus have [70]–[72] han publicado recientemente monografías amplias sobre el uso del metacaolín como sustituto puzolánico parcial del cemento y su efecto sobre las propiedades de morteros y hormigones.

El Metacaolín es un material silicoaluminoso activado que se obtiene mediante la calcinación a  $650 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  de una arcilla llamada caolín [73].

Según diferentes estudios podemos decir algunas ventajas o cualidades que presenta el Metacaolín, como son:

- *Puede ser una alternativa adecuada al humo de sílice en la formulación de alta resistencia o de altas prestaciones [74].*
- *Mejora las propiedades del hormigón, y a la vez garantiza una buena trabajabilidad [73].*

- Presenta una textura más suave y fragua más rápidamente, produciendo menos exudación y permitiendo un mejor acabado que los demás hormigones con humo de sílice [75], [76].
- Aumento de las resistencias mecánicas, tanto a flexión como a compresión [77],[78]–[81].

Frente al cemento Portland, el Metacaolín presenta algunas características como pueden ser: el incremento de las propiedades mecánicas especialmente a edades tempranas, incremento de resistencia al ataque de sulfatos, y decrecimiento de permeabilidad.

Tabla II-7 Propiedades físicas y químicas del Metacaolín (MK). \* Valores correspondientes al material con  $d_{50} = 5$  micras. Fuente: propia elaborada a partir de ficha del producto.

Propiedades físicas*			Análisis químico	
Aspecto/color	Polvo blanco		% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,24
Pérdida de calcinación	< 1,50 %		% SiO <sub>2</sub>	54,61
Puzolanidad (Ensayo Chapelle)	988 g Ca(OH) <sub>2</sub> /g		% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25
Superficie específica (Blaine)	10,971 cm <sup>2</sup> /g		% TiO <sub>2</sub>	1,08
Demanda de agua	106,20%		% CaO	< 0,10
Índice de actividad resistente 28 días	111,6 %		% MgO	< 0,10
Densidad Aparente: Aireada	600 kg/m <sup>3</sup>		% Na <sub>2</sub> O	0,02
Compacta	800 kg/m <sup>3</sup>		% K <sub>2</sub> O	1,44
Peso Específico	2,54 g/cm <sup>3</sup>			

### II.1.3 Las fibras

Las fibras utilizadas para reforzar matrices cementantes pueden clasificarse por su origen en la Figura II-2.

[76], [82]–[84]:

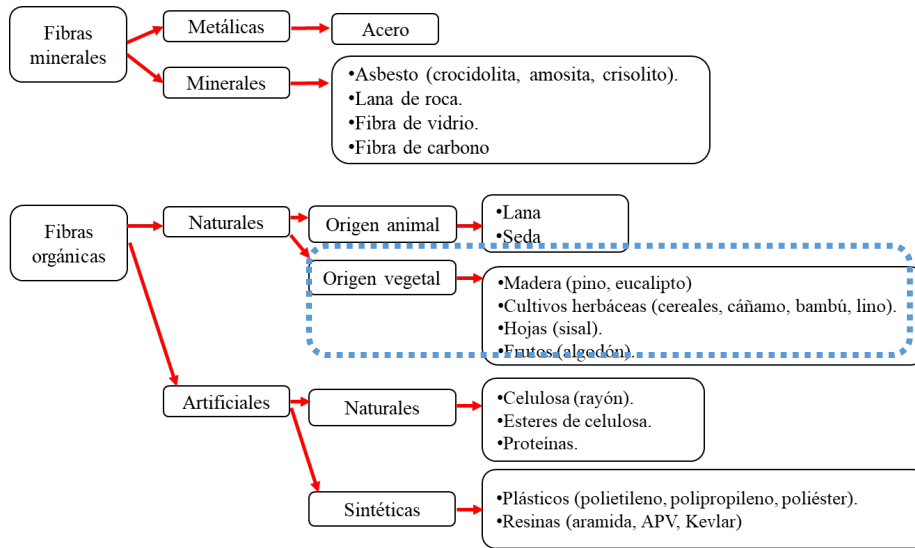


Figura II-2 Clasificación de las fibras según su origen: Fuente: Elaboración propia.

En la Figura II-3a continuación, se muestran algunos tipos de fibras vegetales.

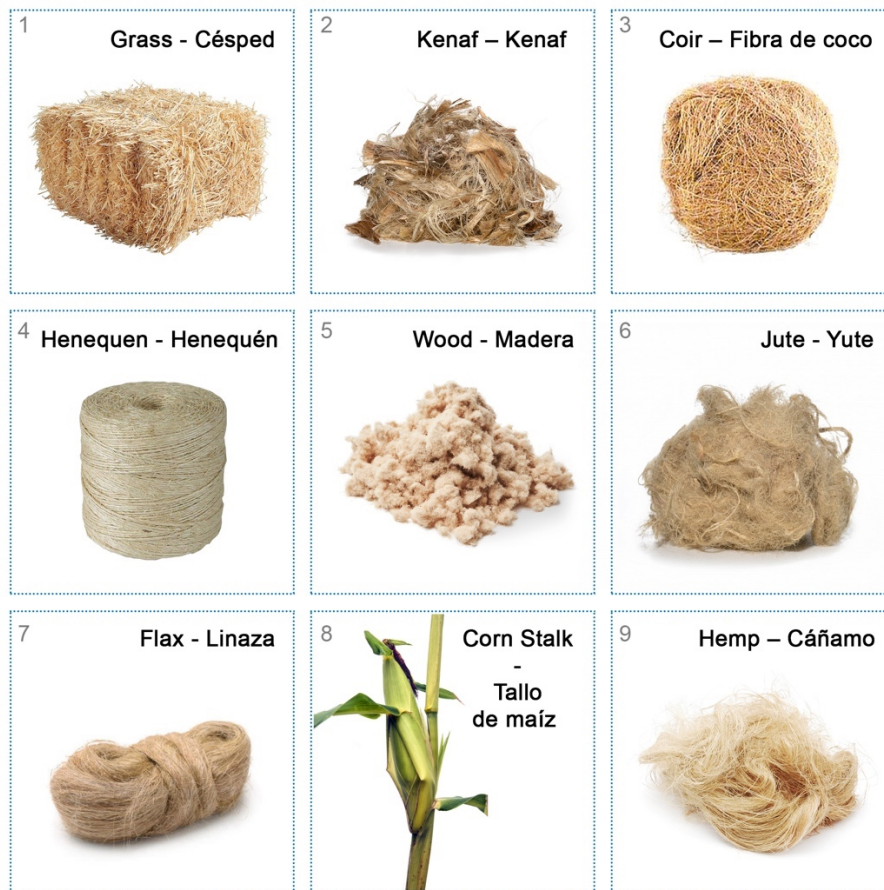


Figura II-3 Fibras naturales y fuentes de fibras naturales.

Fuente:

Grass – césped <https://avatarenergia.com/casas-de-paja/pacas-de-paja-cuadradas/> [ accessed: 13-may-2020]  
 Corn stalk – Tallo de maíz <https://www.shutterstock.com/image-photo/corn-stalks-on-white-background-ears-564027754> [ accessed: 31-may-2020]  
 Madera <https://hunton.fi/tuotteet/seina/hunton-nativo-puukuitueriste/> [ accessed: 13-may-2020]  
 Coir – Fibra de coco <https://id.all.biz/coconut-fiber-products-g33651> [ accessed: 25-oct-2020]  
 Flax – Linaza <https://www.indiamart.com/proddetail/flax-fiber-19512576473.html> [ accessed: 13-may-2020]  
 Henequen – henequén <https://www.baratadelvalle.com/producto/cable-de-henequen-de-un-cabo-2-kg/> [ accessed: 12-may-2020]  
 Jute – Yute <https://www.altex.de/en/textil-recycling/products/bast-fibre> [ accessed: 12-may-2020]  
 Hemp – Cáñamo [https://www.concreteconstruction.net/article/hemp-fibers-make-concrete-stronger\\_c](https://www.concreteconstruction.net/article/hemp-fibers-make-concrete-stronger_c) [ accessed: 13-may-2020]  
 Kenaf – Kenaf <https://www.altex.de/en/textil-recycling/products/bast-fibre> [ accessed: 12-may-2020]

### II.1.3.1 Tipos de fibras

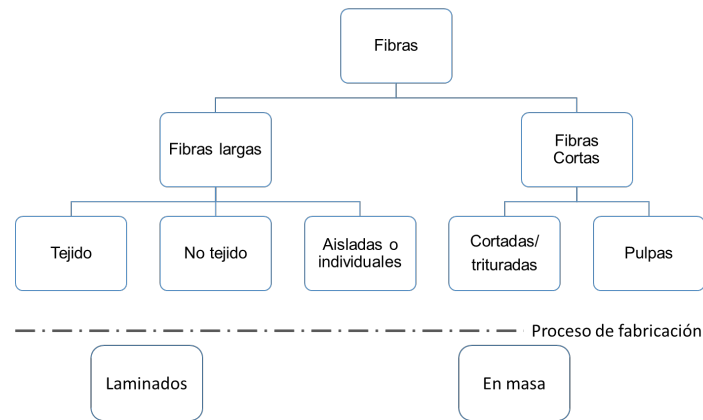


Figura II-4 Clasificación de las fibras por su forma y método de aplicación dentro de un compuesto. Fuente: Elaboración propia.

Las fibras también se clasifican por su forma y método de aplicación dentro de un compuesto, Figura II-4.

De acuerdo con la bibliografía consultada, la mayoría de estudios utilizan fibras cortas o pulpa colocadas en la matriz de forma aleatoria. Se logra incorporar hasta un máximo de 10 % de fibras, pues pasado cierto límite la fibra tiende a formar grumos y generar una mala distribución dentro del compuesto.

Por otro lado, en minoría, están los estudios que utilizan las fibras largas, colocadas algunas veces por capas dentro de la matriz, de forma de tiras alineadas o como una estructura textil. Los más comunes son

los textiles de fieltro, donde las fibras son distribuidas aleatoriamente. Los textiles tejidos son poco utilizados [85].

En el desarrollo de esta tesis doctoral trabajaremos con una fibra natural de origen vegetal que es el fieltro de lino.

### II.1.3.2 Las fibras vegetales

Las fibras vegetales como complemento para la fabricación de materiales para la construcción se remontan a épocas pasadas. Muchas de las investigaciones sobre su uso como refuerzo de matrices de cemento han sido originadas debido a la gran disponibilidad y alta resistencia de las mismas.

Esa gran disponibilidad combinada con su proceso de producción simple hace que estas fibras sean potencialmente adecuadas para la aplicación en construcciones de bajo coste económico y medioambiental [86], pudiendo ser utilizadas como materiales convenientes para el refuerzo de matriz frágil, a pesar de que presentan un rendimiento frente a la durabilidad relativamente pobre [9].

El uso de estas para el refuerzo de un material compuesto presenta un problema con su durabilidad en medios alcalinos, particularmente en las matrices de cemento. En cuanto a su resistencia a la rotura, se aprecia que el refuerzo de matrices de cemento con este tipo de fibras proporciona mejoras al material, así como un incremento en la energía absorbida que justificaría su uso para elementos que requirieran resistencia al impacto [87]–[90],[91].

#### **II.1.3.2.1 Estructura de la fibra vegetal**

Una fibra es una célula vegetal que forma parte del tejido de las plantas. Posee una pared celular gruesa y tienen forma alargada y hueca .

La estructura de la pared celular está formada por la agrupación de cadenas de celulosa desde las micelas hasta las microfibrillas. Estas se ordenan concéntricamente por capas con diferente inclinación de las microfibrillas.

Las micelas se agrupan de manera ordenada en microfibrillas. Estas a su vez se concentran paralelamente en microfibrillas.

Las microfibrillas pasan a formar las paredes de la fibra vegetal. Cada una de estas microfibrillas están unidas entre sí gracias a unos polímeros naturales que actúan de aglomerantes:

- *Lignina*
- *Hemi-celulosa*
- *Pectina*
- *Extensina*

Estos polímeros son afectados por el calor, la alcalinidad, disoluciones ácidas, etc., reduciendo su durabilidad, y, por ende, su capacidad de refuerzo.

Podemos ver la composición de algunos tipos de fibras en la Tabla II-8 Composición porcentual de algunas fibras vegetales.

Tabla II-8 Composición porcentual de algunas fibras vegetales

Fibra	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Humedad %
Cáñamo <sup>a</sup>	1,48	88-90	7-10	1,5-2,0	3,5-8,0
Sisal	1,45	65	12	9,9	10
Plátano <sup>b</sup>	1,35	63-64	19	5	10-11
Piña <sup>b</sup>	1,53	81	-	12,7	13,5

También encontramos otros componentes minoritarios como agua, péptidos, proteínas y material inorgánico[4].

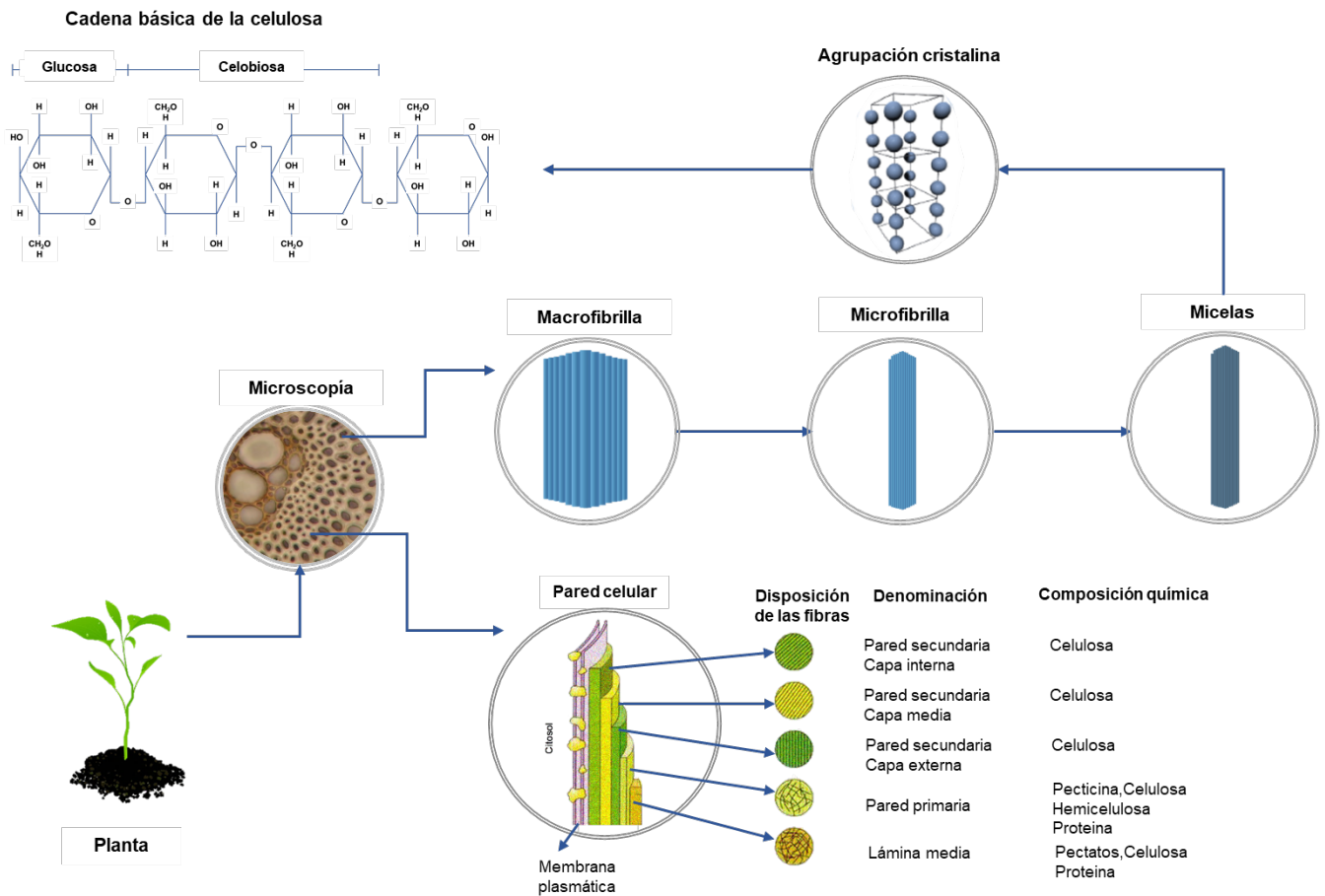


Figura II-5 Estructura de la fibra vegetal. Fuente: Elaboración propia.

Entre las ventajas y desventajas del uso de las fibras vegetales están [7], [8], [23], [29], [30]:

- **Ventajas:**

- Bajo peso específico, que se traduce en mayor resistencia específica que otras fibras como las de vidrio, especialmente a solicitaciones de flexión.
- Alta resistencia a la tracción y deformación. Gracias a ello brindan al compuesto una elevada ductilidad, muy recomendable para admitir cargas dinámicas o accidentales de impacto.
- Constituyen un recurso renovable, con poco consumo de energía para su elaboración.
- Son reciclables, dependiendo del tipo de matriz que las incorpore.
- Gracias a su naturaleza hidrofílica, las fibras vegetales son ideales para matrices hidráulicas.
- Proporcionan buenas propiedades térmicas, acústicas y aislantes.
- Pueden obtenerse mediante inversiones de bajo costo, lo que permite su desarrollo industrial en países en vías de desarrollo.

- En general, el método de obtención es inocuo y no representa riesgos para los manufactureros.
- Costo económico bajo.

- **Desventajas:**

- Alta dispersión en sus propiedades, dependiendo de factores como el clima o el método de obtención.
- Alta absorción de agua, llegando a valores que sobrepasan el 100 % en una hora de inmersión. Esto produce importantes variaciones de peso y volumen, afectando su durabilidad y resistencia mecánica.
- Bajo módulo elástico.
- Mala durabilidad en un medio alcalino.
- En general tienen baja resistencia al fuego.
- Falta de continuidad en los suministros y disponibilidad (dependiendo del tipo de fibra).

De las desventajas descritas, una de las más importantes es la baja resistencia al álcali, que conlleva un deterioro relativamente rápido de la fibra en una matriz con base de cemento portland. La descomposición que sufre la celulosa, hemicelulosa y lignina por reacción



con el hidróxido de calcio, disminuye en gran medida el refuerzo proporcionado por la fibra hasta prácticamente anularlo [28].

### II.1.3.2.2 Fielros de fibras vegetales

Los fieltros son telas de fibras, ya sean naturales o creadas por el hombre, las cuales no han sido hiladas y que se encuentran unidas por medio de distintos procedimientos mecánicos, térmicos o químicos [92]. Los fieltros pueden tener una vida útil corta o larga, dependiendo de su composición, donde los materiales y técnicas de producción constituyen un factor diferenciador clave.

A continuación, se mencionan algunas de las propiedades que se pueden llegar a obtener por medio de la utilización de estas telas no tejidas: porosidad, elasticidad, absorbencia, ligereza, resiliencia, entre otras. Cabe resaltar que su implementación representa también una alternativa económicamente viable, ya que los costos de producción disminuyen considerablemente al evitar el proceso de hilatura, que incrementa el valor de los productos en el mercado.

- **Tipos de fieltros**

- Telas de fieltro verdaderas: realizadas con fibras elegidas y formando planchas aprestadas y adheridas unas con otras.
- Fieltro con base de pelos y lana: por medio de acción mecánica de mezcla, forman una lámina sin apresto.
- Napas: formadas con fibras de variada calidad entrelazada, con o sin encolar.
- Papeles con base de fibras sintéticas o artificiales: consiste en fibras de corta longitud, sustentadas por medio de un encolado.

Los fieltro posibilitan nuevas aplicaciones en distintos sectores y, actualmente, existe un notable incremento de su producción a nivel mundial. Las innovaciones en los fieltros van en aumento debido a su creciente demanda, gracias a la variedad de posibilidades que ofrece este tipo de material y la versatilidad en sus aplicaciones en el sector industrial.

### II.1.3.2.3 Fibras de lino

El lino (*Linum usitatissimum*) es una planta anual que forma parte de la familia de las

lináceas, se cultiva de forma comercial por sus fibras y semillas. Las fibras de lino han sido utilizadas como textil desde el antiguo Egipto. Por otro lado, también tienen otros usos comerciales, como por ejemplo la fabricación de materiales compuestos o la industria papelera (papel de cigarrillos, bolsitas de té, papel artístico ...).

Las plantas de lino tienen dos partes principales de su tronco, de donde se extrae la fibra: la primera corresponde a la parte más externa de este, que contiene las fibras más largas; y la segunda localizada en la parte interna del tronco o núcleo, donde podemos encontrar las fibras más cortas.

Si hablamos de la composición química de las fibras de lino podemos ver que están formadas por lignina y celulosa, tal y como se ha comentado en el punto anterior. Las propiedades de las fibras de lino dependen en gran medida de la proporción de sus componentes y también de otros compuestos principales como la hemicelulosa. Por lo tanto vemos que su composición química queda de la siguiente manera[93]:

- *Lignina (5 %)*
- *Hemicelulosa (6 %)*

- *Celulosa (78 %)*

Debido a la gran proporción de celulosa presente, nos encontramos en frente de unas fibras altamente flexibles y maleables.

#### **II.1.3.2.4 Filtro de fibra vegetal de lino**

El fieltro como es conocido comúnmente por sus siglas en inglés NW (*Non-woven*) de fibra vegetal de lino, se utiliza como refuerzo. Se escoge un fieltro con la finalidad de incorporar el mayor número posible de fibras largas, y a su vez, mantener un comportamiento isotrópico en la pieza fabricada.

Es una estructura laminar, unida entre sí por enredo de fibras o filamentos mediante procesos mecánicos, térmicos o químicos... no son realizadas mediante tejidos o puntos, ni tampoco requieren de la conversión previa de las fibras en lana o hilo".

En el trabajo previo de Claramunt, J. et al. [94], comentan que las telas no tejidas más adecuadas fueron aquellas que presentaban una "estructura más abierta, es decir, con menor grado de punzonamiento y menor gramaje". El mejor fieltro es el de 275g/m<sup>2</sup> y doble punzonado. Es suficientemente abierto

para las dimensiones del grano de cemento y acumula mucha fibra bien trabada.

En las investigaciones realizadas con refuerzo de fibras vegetales se han utilizado fibras cortas, largas y pulpa. La adición de fibras tiende a reducir la trabajabilidad de la mezcla.

Dentro de los factores a tomar en cuenta en el uso de fibras vegetales como refuerzo de un material cementicio, interfieren los descritos a continuación:

- Volumen de Fibra

La cantidad máxima de fibra que se puede incorporar a un compuesto dependerá de la forma de fabricación del compuesto, y a su vez, del tipo de fibra.

Gram [20], en su estudio de materiales compuestos de matriz de cemento y fibras de sisal, comenta que a mayor cantidad de fibras que incorporemos en el compuesto se necesita mayor cantidad

de agua para garantizar la misma trabajabilidad, teniendo en cuenta que la fibra misma absorberá una parte de esta agua.

La Tabla II-9 Porcentajes de fibras utilizadas por investigadores que han trabajado con fibras vegetales Fuente: J. Claramunt et al 2015. nos muestra una recopilación de los porcentajes utilizados por algunos investigadores que han trabajado con las fibras vegetales como refuerzo de compuesto.

Un inconveniente encontrado en las fibras en general, pero en especial en trabajos con las fibras largas, es el "enredamiento" o "formación de grumos" en el momento de mezclado, evitando una distribución isotrópica y buena trabajabilidad de la mezcla fresca. Esto sucede cuando las fibras son incorporadas en masa y en mayor volumen. Las fibras delgadas y cortas se enredan menos que las fibras largas y gruesas. Es por ello que es posible agregar un mayor volumen de fibras cortas o en pulpa, que fibras larga [95].

Tabla II-9 Porcentajes de fibras utilizadas por investigadores que han trabajado con fibras vegetales  
Fuente: J. Claramunt et al 2015.

Fuente de fibra	Forma de fibra	Peso %
Madera blanda (pinus)	Pulpa (química-kraft)	4 - 12
		10
		1, 2, 3, 5
		4
		1, 3
		1 - 14
		5, 10, 15
		8
		0 - 7
		4
	Pulpa (termomecánica)	1 - 3
		3.5, 8
	Hojas de papel	2.5
Pulpa (kraft químico) de residuos	2 - 16	
	-	
Madera dura (eucalipto)	Pulpa (química-kraft)	8
		10
		5
		1, 2, 3, 5
		2 - 4
		4
Planta de cultivo (fibra de líber): yute	Hilos (13 – 152 cm)	-
Planta de cultivo (fibra de líber): cáñamo	Hilos (13–152 cm)	-
Planta de cultivo (fibra de la hoja): sisal	Pulpa (kraft)	4 - 12
	Grapa	4
		-
	Hebras (18–60 cm)	3 (v.)
		10 (v.)
Planta de cultivo (fibra de la hoja): Malva	Grapa	4 (v)
Planta de cultivo (fibra de hoja): plátano	Pulpa (química-kraft)	8
		4
Planta de cultivo (fibra de hoja): Agave lechuguilla	Grapa	-
Planta de cultivo (fibra de la hoja): fique	Pulpa	3
		2.5
Planta de cultivo (fibra de semilla): fibra de coco	Grapa	4 (v.)
		3 (v.)
	Malla	-
	Pulpa	2.5
Planta de cultivo (fibra de semilla): linters de algodón	Pulpa	4
Agrícola	Pulpa	2-4
Residuos: tallo de caña de azúcar	(mecánico)	
Residuos agrícolas: paja de trigo	Pulpa (mecánica)	2-4

Es cierto que las fibras cortas permiten incorporar una mayor cantidad de volumen hasta en cuatro veces más el volumen máximo de las fibras largas. A mayor cantidad de fibra incorporada, el compuesto será menos denso y más dúctil.

Una opción para optimizar el mayor volumen de fibra larga dentro del compuesto sin que presente problemas de enredo al momento de homogeneizar ni formación de grumos, es la utilización de los fieltros, permitiendo este un comportamiento isotrópico en el producto resultante.

- Orientación de la fibra

La disposición de las fibras dentro de un material compuesto influye notablemente en la resistencia. Con respecto a la orientación, existen dos situaciones extremas:

- Alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras.
- Alineación al azar.

Las fibras largas, generalmente por su composición se organizan de una forma más organizada, mientras que las fibras cortas se pueden alinear total o

parcialmente o bien se pueden orientar al azar.

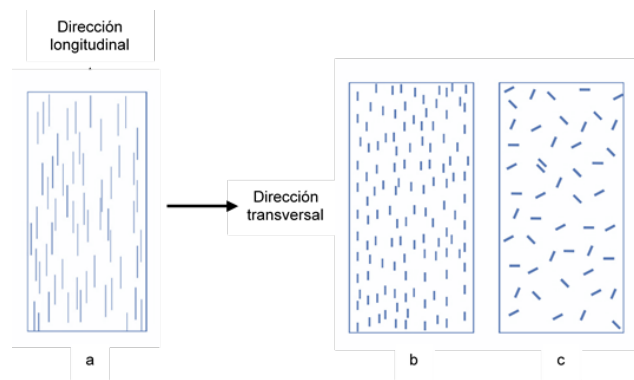


Figura II-6 Tipos de refuerzos de fibras (a) continuas y alineadas, (b) discontinuas y alineadas, y (c) orientadas al azar. [96]

- Influencia de la longitud de la fibra

Las características mecánicas de los composites reforzados con fibras dependen, además de las propiedades de las fibras, del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra a través de la matriz. Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto[96].

Si bien es cierto que las mayores resistencias de los materiales compuestos se alcanzan con fibras largas, llamadas continuas; esta condición depende de la dirección de aplicación de la carga. La resistencia es significativa a lo largo de la dirección de alineación de fibras, mientras que en sentido transversal el reforzamiento prácticamente no existe.

Para mejorar la distribución de fibras largas en un VFRC<sup>5</sup>, Claramunt et al. [4], proponen refuerzos de estructuras no tejidas de fibras naturales para compuesto "Estructuras no tejidas de fibras naturales como refuerzos para compuestos de cemento de elevada ductilidad". Realizan pruebas con textiles (fieltro) de distintos gramajes, y a la vez se hacen una comparativa entre dos compuestos preparados bajo las mismas condiciones: el primero con textiles (fieltro) y el segundo con fibra en forma de pulpa.

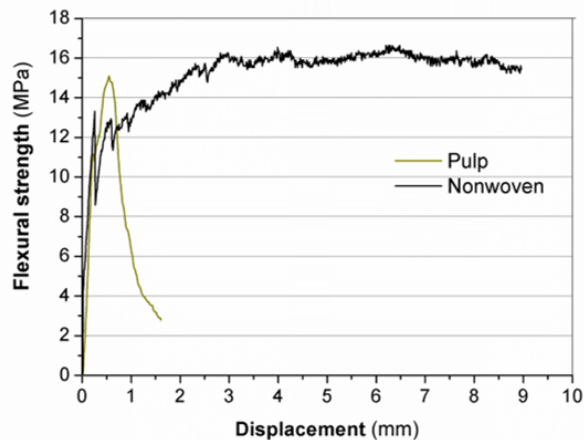


Figura II-7 Curvas deformación esfuerzo para los compuestos reforzados con las estructuras no tejidas comparadas con las reforzadas con pulpa. Fuente: Claramunt, J. [et al.]. Estructuras no tejidas de fibras naturales como refuerzo para compuestos de cemento de elevada ductilidad. A: Congreso Nacional de Materiales Compuestos. "Actas del X Congreso Nacional de Materiales Compuestos celebrado en Algeciras el 2,3,4 y 5 de julio de 2013". Algeciras: 2013, p. 317-321.

La diferencia entre las dos se debe a la velocidad de transferencia de esfuerzos entre la fibra y la matriz; el compuesto con pulpa traspasa de manera mucho más rápida las cargas que los fieltros, por lo que se aprecia la curvatura más pequeña cuando llega a su rotura total. Sin embargo, en la reforzada con el fieltro se percibe la transferencia de esfuerzos más lenta, Figura II-7.

Los compuestos reforzados con fibras cortas presentan un comportamiento isotrópico ante los esfuerzos mecánicos. Aunque la eficiencia del reforzamiento es menor, la resistencia a esfuerzos multidireccionales es más efectiva y uniforme.

Por otro lado tienen velocidad y coste de producción menor que los compuestos con fibras continuas, ya que pueden ser configurados mediante moldeo por compresión, por inyección y extrusión [96].

<sup>5</sup> VFRC Por sus siglas en inglés, se refiere al compuesto de cemento reforzado con fibra vegetal.

## II.2 Material compuesto

Un material compuesto no es más que un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, de manera que presente la mejor combinación posible.

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases:

- Matriz.
- Fase dispersa.

Los materiales compuestos están clasificados de la siguiente manera Figura II-8.

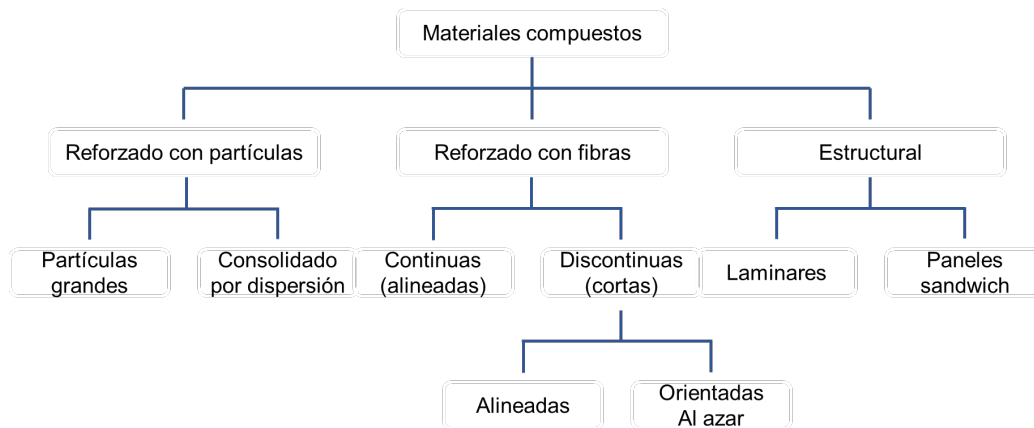


Figura II-8 Clasificación de los materiales compuestos. Fuente: Adaptación ([9], [96]).

Para el buen funcionamiento del conjunto, tanto de la fibra como de la matriz, hay unas funciones específicas que se deben tomar en cuenta [9]:

- Mejorar la resistencia y comportamiento a tracción o flexión del material.

Las fibras son las responsables de:

- Reducir o eliminar la propagación de las fisuras.
- Modificar la densidad del producto resultante.

La matriz cementicia es la responsable de:

- Transferir las tensiones provocadas por las acciones externas a las fibras.

- Fijar las fibras en su posición.
- Proteger las fibras del ambiente externo.

Para que cada componente cumpla su función es necesario que la zona de transición entre fibra y matriz sea capaz de:

- Desarrollar una adherencia adecuada para proteger la fibra de las agresiones mecánicas internas por transmitir correctamente las tensiones.
- Evitar el contacto directo entre fibras.

#### 1.1.1. Características de los elementos

Las propiedades de los componentes que determinan las características del producto compuesto son:

- Propiedades de las fibras:
  - Resistencia y módulo de elasticidad a tracción de las fibras:
    - Individuales.
    - En fajo.
    - Tras la manufactura.
  - Esbeltez de la fibra (coeficiente de forma).
  - Tipo de fractura de la fibra (fragilidad-ductilidad).

- Dosificación de fibra.

- Propiedades de la matriz cementicia:

- Resistencia y módulo de elasticidad a compresión.
- Resistencia y módulo de elasticidad transversal.
- Longitud crítica de inmersión de las fibras.

- Modificación de la reología o plasticidad de la pasta por inclusión de fibras.

- Propiedades de la zona de transición:

- Adherencia fibra-matriz.
- Porosidad.
- Alterabilidad por interacción química fibra-matriz.

Además, el proceso de fabricación también puede modificar las características del producto resultante (el método de formación, la orientación de las fibras y su distribución, la compactación y curado).



### II.3 Comportamiento de la fibra vegetal en la matriz cementicia

Los materiales compuestos están formados a su vez como mínimo por una matriz y un refuerzo. Cada uno presenta propiedades físicas, químicas y mecánicas de manera individual.

Al combinar estos dos materiales, la naturaleza de cada uno de ellos puede afectar al comportamiento del material compuesto.

#### II.3.1 Variación de volumen con los cambios de humedad

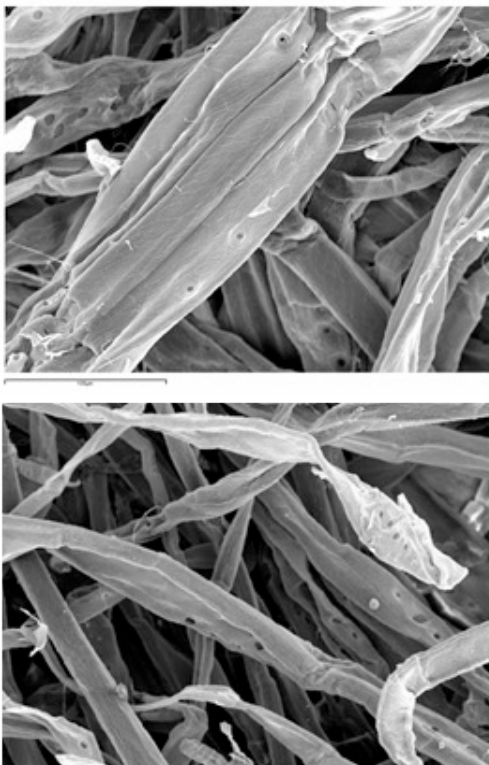


Figura II-9 Micrografías de encogimiento de la fibra. Fuente: Claramunt, J., et al. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. Carbohydrate Polymers (2009), doi:10.1016/j.carbpol.2009.07.057

La Figura II-9 nos muestra cómo se aprecia el mecanismo de encogimiento de la fibra de sisal ensayada a 28 días, y sometida a 25 ciclos de humectación y secado [68]. Mohr, ha visto en sus estudios que, con un ciclo, ya es suficiente para que la fibra se desprenda de la matriz[55].

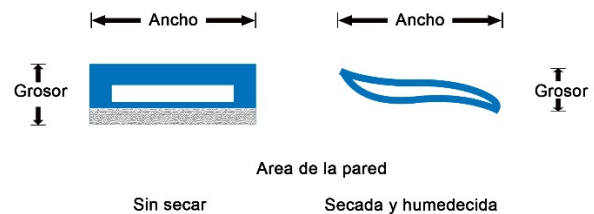


Figura II-10 Diagrama esquemático de fibra seca y no seca. Fuente: WEISE .

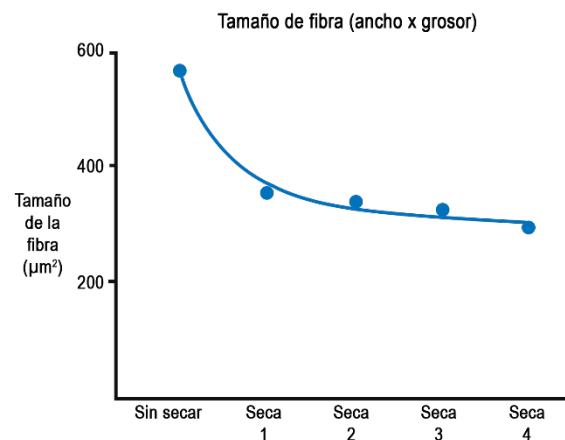


Figura II-11 Tamaño de fibra de fibras no secas, secas y rehumectadas Fuente: WEISE.

En la Figura II-11 tamaño de las fibras (ancho por grosor) disminuyó bruscamente cuando las fibras se secaron por primera vez. Luego se aprecia que

disminuía ligeramente al aumentar los tratamientos de secado y rehúmedación[97].

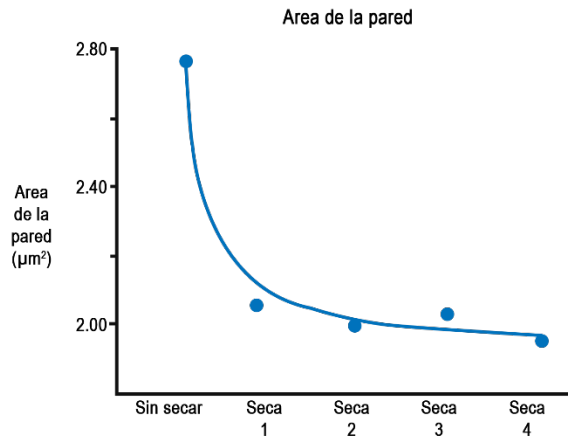


Figura II-12 Área de la pared de fibras no secas, secas y rehúmedadas. Fuente: WEISE

En el Figura II-12 vemos cómo el área de la pared de la fibra siguió un patrón similar que disminuyó progresivamente con el aumento del número de tratamientos de secado realizado a la fibra.

La Figura II-10 muestra una comparación realizada a unas fibras de pulpa de Kraft en dos estados; seco y húmedo. Las secciones transversales de las dos fibras húmedas en el estado inicial, nunca seco (A), y después de ciclos de rehúmedación o generación (B, C y D).

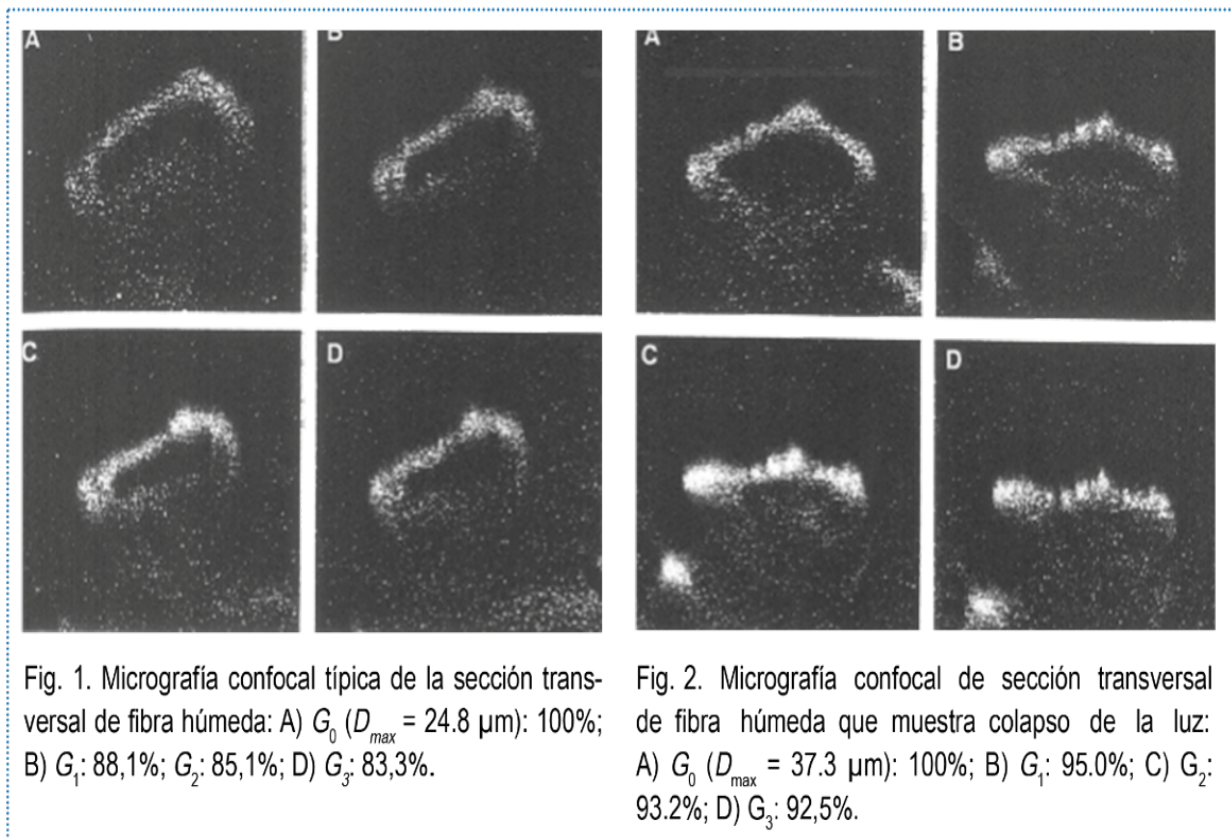


Figura II-13 Micrografías de fibras húmedas. Fuente: WEISE

Cabe destacar que la mala calidad que presentan estas imágenes es producto de que fueron captadas sin inmersión del objetivo, por el método de mejora de imagen de núcleo elíptico. Sin embargo, es notorio el cambio de forma y de tamaño de las fibras [98].

En imágenes de fibras húmedas se aprecia que cuanto más a menudo las fibras se secan y se vuelven a humedecer, mayor es la reducción de la hinchazón, por lo que no se observaron cambios en resultados de fibras secas, concluyendo que el secado de la fibra causa una pérdida debido a cambios submorfológicos en la pared de la fibra[98].

La degradación es otro proceso que experimentan las fibras, y se puede clasificar en:

- a. Degradación celulosa.
- b. Degradación de la hemicelulosa.
- c. Degradación de la lignina.

La fibra vegetal está formada por cadenas de celulosas. Al estar sumergidas en solución alcalina (con contenido de OH), los iones se incorporan a la celulosa provocando que se forme el ácido ososacaránico.

Cuando la fibra se seca, la celulosa vuelve a su estado normal, pero cuando la solución alcalina tiene presente también iones de  $Ca_2$  provocan rupturas de las cadenas de celulosa en la fibra en este proceso de secado.

Es por ello que decimos que la hidrólisis alcalina se come la celulosa, y por eso se ocasiona lo que apreciamos en la *Figura II-14*.

La fibra debido a su composición, es por sí un material vulnerable ante los ataques de microorganismos. Al encontrarse dentro de una matriz quedan protegidas, salvo que presenten estas algunas fisuras o grietas que permitan que ingresen agentes y estas sean atacadas.

Como es bien sabido, toda matriz que utiliza cemento como base tiene un pH elevado (aproximadamente 12,4 pH), o sea que son altamente alcalinos.

Existe una degradación de las fibras naturales cuando están inmersas en la matriz cementante debido a que ambientes de elevada alcalinidad de la matriz disuelven los compuestos primarios de las fibras, como son la lignina y la hemicelulosa, y en consecuencia, se

debilita su microestructura [99].

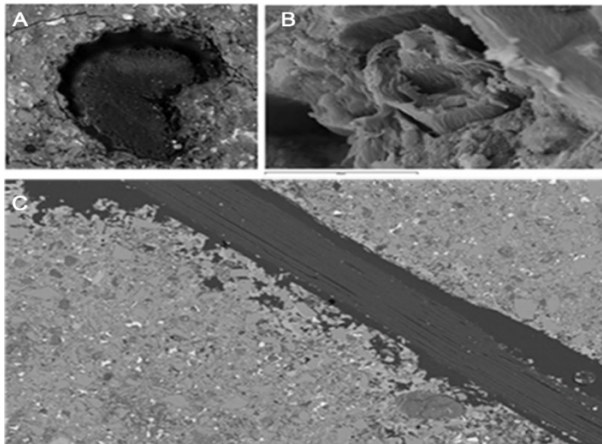


Figura II-14 Desprendimiento de fibras de la matriz. Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., Perron, H., Ventura, H., & Manich, A. M. (2014, June). Effects of drying and rewetting cycles on the water absorption of vegetable fibres for composite reinforcement. *Congress for Biobased Materials, Natural Fibres and WPC*

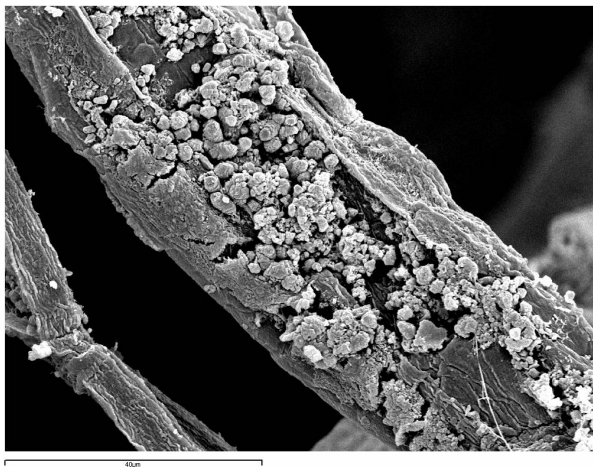


Figura II-15 Fibra inmersa en cemento portland después de 5 ciclos seco-húmedo. Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>

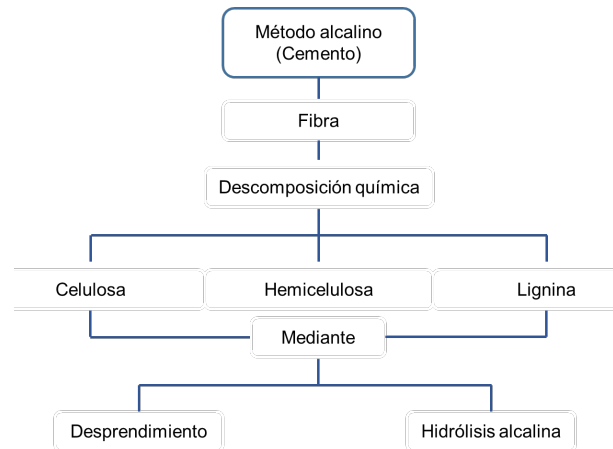


Figura II-16 Descomposición en un medio alcalino. Fuente: Elaboración propia.

El medio alcalino influye directamente en la estructura química de las fibras vegetales por la ruptura de enlaces químicos[101].

En la celulosa se rompen los enlaces glucosídicos, lo que influye en el grado de polimerización y la ruptura de los enlaces por puente de hidrógeno intermoleculares

disminuyendo su cristalinidad. Además, en la lignina se hidrolizan los enlaces de tipo éster y éter entre esta y los carbohidratos, lo que se evidenció con la presencia de carbohidratos sencillos con el ensayo de Molish y con la reducción de la elongación de las fibras respecto a la fibra patrón[101].

La naturaleza química del hidróxido utilizado en la preparación del medio alcalino influyó en las propiedades de las fibras.

Con el hidróxido de sodio, la hidrólisis de los enlaces químicos de los componentes de la fibras vegetales es mayor, de ahí que se produzca mayor degradación de la misma, lo que se pone de manifiesto en la mayor cantidad de carbohidratos en el medio acuoso, y menores valores de elongación respecto a los de las fibra sumergidas en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [102].

### **II.3.2 Degradación del material compuesto con los ciclos seco-húmedos.**

- 1- Pérdida de adherencia: por los cambios de volumen de las fibras con la humedad.

En los últimos años, se han desarrollado numerosos estudios para contrarrestar el problema que han venido presentando los morteros reforzados con fibras vegetales (sisal, bambú, fique, cáñamo, lino, yute y ramio), por ejemplo, [9][56], [103], [104] la falta de durabilidad.

Gram [105] comenta que, la alcalinidad del poro de agua de la matriz deteriora la fibra

a un grado tan elevado que llega incluso a anularla por completo. Sin embargo, cuando la matriz es remplazada parcialmente con una puzolana altamente reactiva o cuando el compuesto pasa por el proceso de carbonatación, las fibras se mantienen intactas, conservando sus propiedades.

Se han venido observando pérdidas significativas en el rendimiento mecánico a largo plazo en los compuestos de fibrocemento vegetal después del envejecimiento natural o acelerado (p. Ej., Ciclo húmedo/seco), debido a los mecanismos de degradación de las fibras de celulosa en el entorno cementoso [106],[107]–[109]. Se han realizado diversos estudios buscando mitigar este problema, dando diferentes enfoques.

### II.3.3 Mecanismo de transporte

El transporte del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hacia las fibras se encuentra condicionado por dos escenarios; las fibras se empapan a través

La figura II-17 nos muestra un esquema de los procesos de migración que hace el hidróxido de calcio de la matriz a las fibras[8].

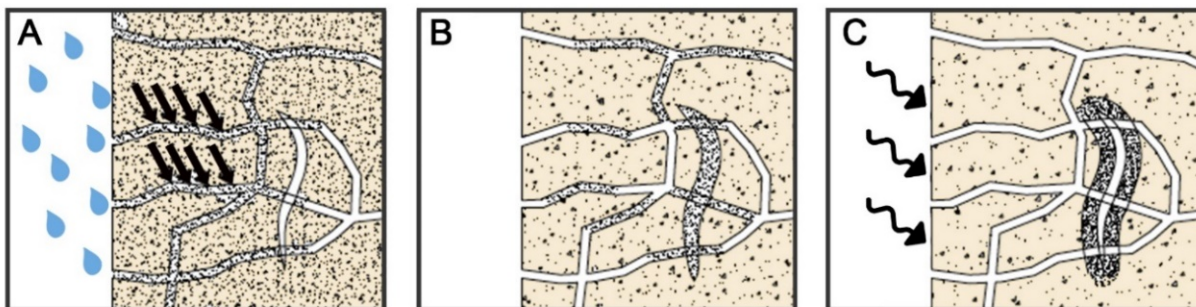


figura II-17 Proceso de migración del hidróxido de calcio a la matriz de las fibras

del agua que pasa por los poros de la matriz con los iones provenientes de la disolución del hidróxido de cal de la pasta. Cuando el fibrocemento se seca, la fibra cede su humedad y se seca conjuntamente con la matriz, generando una precipitación que es más importante en la fibra que en la propia .

Durante un ciclo de humedecido, el agua que penetra por los poros de la matriz disuelve de nuevo el hidróxido de cal, mientras las fibras absorben el líquido gracias a su capacidad de almacenar el agua. La repetición de este procedimiento en el tiempo provoca la migración de este material desde la matriz a las fibras.

- En el cuadro A nos muestra una matriz seca expuesta a la intemperie, se moja y empapa sus poros, el agua lluvia disuelve el hidróxido de calcio a medida que la humedad avanza del exterior hacia el interior más seco.
- En el cuadro B se observa como la humedad llega a una fibra, la capacidad de absorción de la que chupa el agua y se hincha.
- En el cuadro C el calor y sequedad externa secan los poros, y gracias a la capacidad de nucleación de las fibras, el hidróxido de cal precipita sobre él o en los alrededores. En aquellas fibras en las que el lumen está en contacto con el exterior, la precipitación también se produce en el interior. Con el tiempo, este

efecto bomba provocará que el contenido de hidróxido de la matriz se vaya concentrando alrededor de las fibras, provocando el ataque alcalino.

Gram[110] explica que la degradación de la celulosa en ambiente alcalino con presencia de cal, se debe a la reconversión de algunas cadenas del polímero en ácido isosacarínico, por lo que relaciona la descomposición de la fibra y pérdida de la resistencia mecánica con la presencia de hidróxido de calcio.

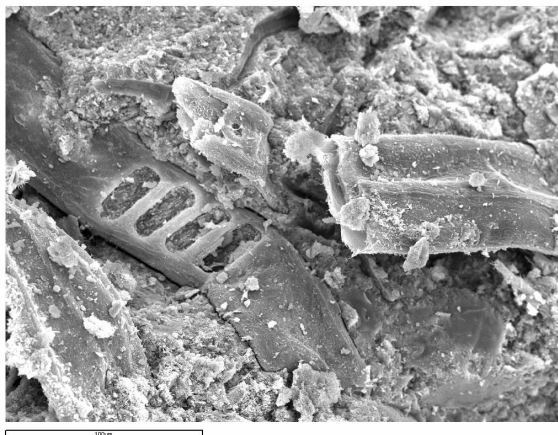


Figura II-18 Micrografía SEM de una fibra pulpa de Kraft, muestra la presencia de los compuestos de hidratación del cemento. Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J. A. J. A., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. *Cellulose*, 18(2), 281–289. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>

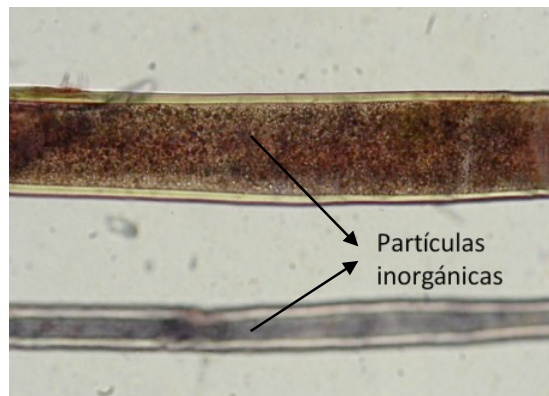


Figura II-19 Microfotografía óptica de una fibra vegetal con depósitos de material en el lumen después de su exposición de 4 meses con cemento. (X400). Fuente: Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J. A. J. A., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. *Cellulose*, 18(2), 281–289. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>

La Figura II-19 a continuación, nos confirma las hipótesis hechas por algunos investigadores en sus trabajos sobre mecanismo de transporte de los químicos (productos de calcio) del cemento hacia las fibras, permitiendo un cambio en la estructura de la fibra provocando un aumento de resistencia en la primera grieta y reducción de la tenacidad durante el envejecimiento (mineralización)[68].

En la figura II-20 (a) se muestra el mapeo de elementos químicos para la muestra de 28 días de referencia); y en la (b) el mapeo de elementos químicos para la muestra sometida a 25 ciclos de humectación y secado.

La manera más efectiva para la mejora del

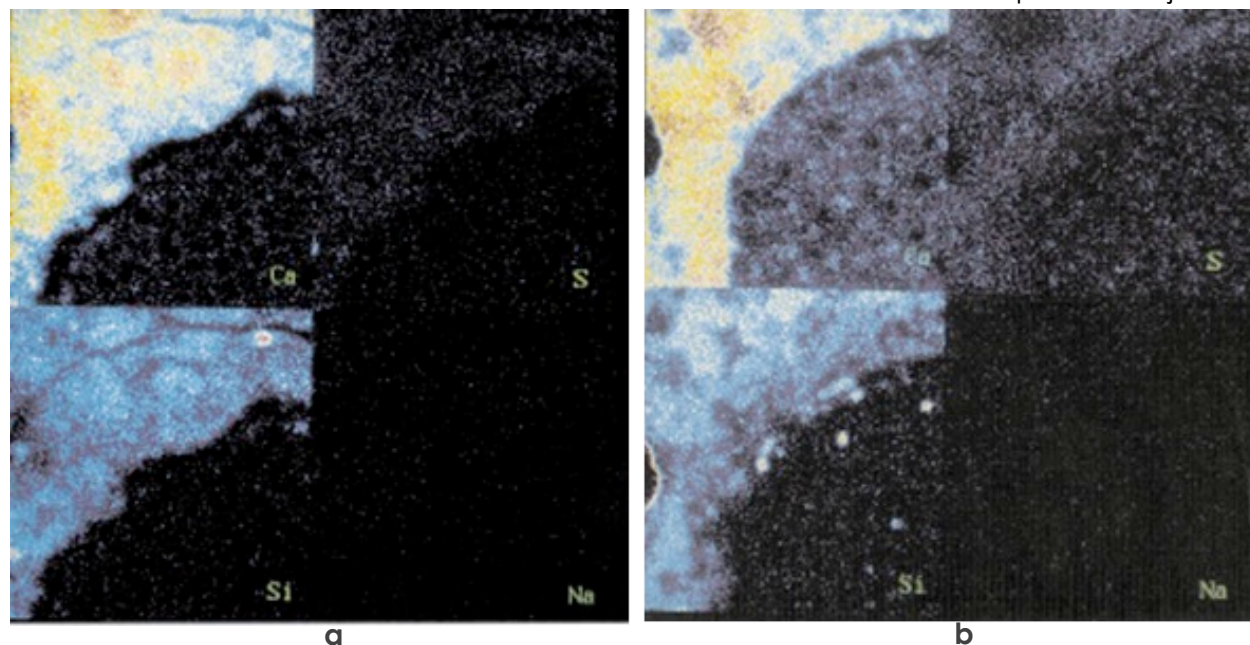


figura II-20 Mapa de puntos de elementos químicos en la interfaz de fibra de coco-mortero. Fuente: foto Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(2), 127–143. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6)

El mapeo nos indica el aumento de Ca presente en las proximidades e interior de la fibra.

#### II.4 Estrategias de mejora de la durabilidad

Existen dos alternativas para mejorar la durabilidad de un compuesto cementicio reforzado con fibras vegetales[39]:

- Modificar la composición de la matriz con el fin de disminuir o eliminar el hidróxido cálcico del material compuesto.
- Modificar las fibras con tratamientos químicos o físicos para aumentar la estabilidad en la matriz de cemento.

fibrocemento consiste en trabajar conjuntamente tanto en la fibra como en la matriz. Con una intervención en la que se mejoren los problemas y deficiencias de ambas partes, se logrará mejorar la durabilidad del compuesto en sí.

Para mejorar la durabilidad de los materiales compuestos de cementos reforzados con fibras naturales (NFRC), se han estudiado varios enfoques.

Los tratamientos tales como; modificaciones de la matriz de cemento portland a través de la adición de puzolanas de humo de sílice y la escoria de alto horno, la carbonatación de la matriz



cementosa, pre-impregnación de las fibras en el humo de sílice en suspensión, recubrimiento de la fibra con el látex, entre otros, han disminuido los efectos del envejecimiento en fibras naturales, pero parece que el enfoque más favorable es el de reducir o reemplazar la porción del cemento portland en la matriz [47].

En esta tesis doctoral, utilizamos el metacaolín como una opción de abaratar costes, así como también para que la reacción de hidratación que se produzca disminuya la conversión a CSH. Al no utilizar el CP, no hay reacción puzolánica de conversión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a CSH.

En el estudio de revisión de estrategias para mejorar la durabilidad de Santos et al. [111] se enfocan en el trabajo a la par de ambos (fibra-matriz). Es conocido que todos los compuestos que utilizan cemento como base tienen una alta alcalinidad [39], es por esto que el mayor problema se da por la alcalinidad de la matriz y la inestabilidad de la fibra. Sin embargo, cuando se habla del CAC es un material que no tiene hidróxido cálcico, pero sí tiene un pH elevado.

Mohr et al. [112] informaron que la lignina y los extractos de madera protegen la fibra de los fenómenos de mineralización, por lo

tanto, el blanqueo de la pulpa hace que la cadena de celulosa sea más susceptible a la degradación, pudiendo tener consecuencias importantes para la durabilidad de las fibras en el compuesto de fibrocemento.

#### II.4.1 Fibras

Como métodos de mejora de la fibra una opción es el recubrimiento de esta con parafina) [99], con silano (metacriloxipropiltri-metoxisilano (MPTS) y aminopropiltri-etoxisilano (APTS, en una proporción del 6 % en masa de pulpa de celulosa.) teniendo como resultado una mejora significativa volviéndose estas más hidrófobas [113]. Los compuestos se prepararon mediante la técnica de deshidratación de la suspensión, usando 5 % en masa de pulpa (no tratada o tratada) en una matriz compuesta por 85 % de CP y 15 % de piedra caliza.

Se realizaron otros estudios para investigar las fibras de pulpa de eucalipto kraft sometidas a tratamiento químico para reducir su carácter hidrofílico [113], [114].

Otra estrategia es el tratamiento térmico denominado proceso de hornificación. La hornificación se refiere a la disminución irreversible de la capacidad de retención

de agua de las fibras celulósicas por la formación de enlaces de hidrógeno en las cadenas de celulosa cuando se someten a ciclos de secado y rehumectación. No modifica la resistencia y la longitud de la fibra, pero causa una reducción en el grosor de la pared celular. Se puede cuantificar por el porcentaje de reducción en los valores de retención de agua [115], [116].

El curado acelerado de carbonatación se ha estudiado para mitigar la degradación de la fibra de celulosa en los compuestos cementosos y para el mantenimiento de su rendimiento mecánico bajo la intemperie. En consecuencia, según estos investigadores, el curado por carbonatación puede ahorrar una cantidad considerable de energía[117]–[121].

La carbonatación puede describirse como la difusión de  $\text{CO}_2$  desde la atmósfera a través de poros insaturados de la matriz cementosa. El  $\text{CO}_2$  se disuelve en la fase acuosa en los poros y se transforma en ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que se disocia en iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ . Además, el hidróxido de calcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] se disuelve en iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$ , lo que resulta en la

precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) [122], [123].

La carbonatación es una alternativa para aumentar la durabilidad de las fibras naturales en la matriz de cemento. Tolêdo Filho et al. [124] informaron un aumento significativo en la durabilidad de los compuestos cementosos reforzados con fibras vegetales después de 109 días de exposición a la atmósfera de dióxido de carbono.

El objetivo del pretratamiento a la celulosa es romper la estructura de la lignina, reducir la cristalinidad de la celulosa, solubilizarla e incrementar la porosidad del material[125].

#### **II.4.2 Matriz**

Algunos autores tienen como objetivo reducir la álcalis libre dentro de la matriz mediante el desarrollo de aglutinantes poco alcalinos basados en productos industriales y/o agrícolas [126]. Otros se han ido por el uso de nanofibrillas de celulosa o microfibras vegetales como nanorefuerzos[44], [127]–[130] y el uso de curado de carbonatación [95], [117], [131], [132].

El uso de puzolanas naturales como adición de cemento puede reducir los medios alcalinos que debilitan las fibras vegetales, disminuyendo los fenómenos de mineralización asociado a la pérdida de tenacidad compuesta a largo plazo[133].

La reacción principal de cualquier material puzolánico es un ataque por iones OH<sup>-</sup> contra la estructura SiO<sub>2</sub> o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>[134]. La transformación completa del hidróxido es difícil ya que la reacción no se produce por debajo de un determinado contenido de hidróxido.

La reacción puzolánica en muchas puzolanas es significativa después de los 7 días, cuando la mayoría de los productos de reacción del cemento ya se han formado y la concentración alcalina es considerable para romper los enlaces y facilitar la formación de productos de reacción del cemento[135].

En muchos casos y dependiendo de la reactividad de la puzolana, muchas de las reacciones finalizan en los primeros 60 días[135].

Sin embargo, el uso de grandes volúmenes de adiciones puzolánicas incrementan el riesgo de la auto-neutralización debido al

excesivo consumo de hidróxido de calcio durante la reacción puzolánica.

Otros autores[136] manifiestan que la reacción puzolánica es beneficiosa para el hormigón, aumenta la cantidad CSH, y en menor medida, hidratos de aluminato de calcio, reduciendo la permeabilidad del sistema. También se conoce que mejoran la resistencia a medio y largo plazo.

En la mayoría de los casos de estudios sobre este tema, la modificación de la superficie de la fibra es un requisito esencial para mejorar la compatibilidad interfacial entre la fibra y la matriz mejorando así la adhesión y por lo tanto obtener un buen comportamiento mecánico del compuesto[68], [137].

## CAPÍTULO 3

### 3. Campaña experimental

#### 3.1 Introducción

#### 3.2 Objetivos de la campaña experimental

#### 3.3 Materiales y métodos

##### 3.3.1 Elección de los materiales de partida.

###### 3.3.1.1 Cemento aluminato de calcio

###### 3.3.1.2 Agua

###### 3.3.1.3 Desencofrante

###### 3.3.1.4 Fluidificante

###### 3.3.1.5 Fibra

### III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para demostrar la viabilidad de la propuesta. Se realizaron los siguientes experimentos:

#### III.1 Introducción

La campaña experimental se basó en la realización de ensayos para lograr un método que minimice los problemas actuales de la durabilidad en los morteros reforzados con fibras vegetales.

A. Ensayos destinados a estudiar la matriz; midiendo su pH, dureza superficial y tiempo de fraguado, así como su resistencia mecánica, ensayados a 7, 28 y 56 días de curado.

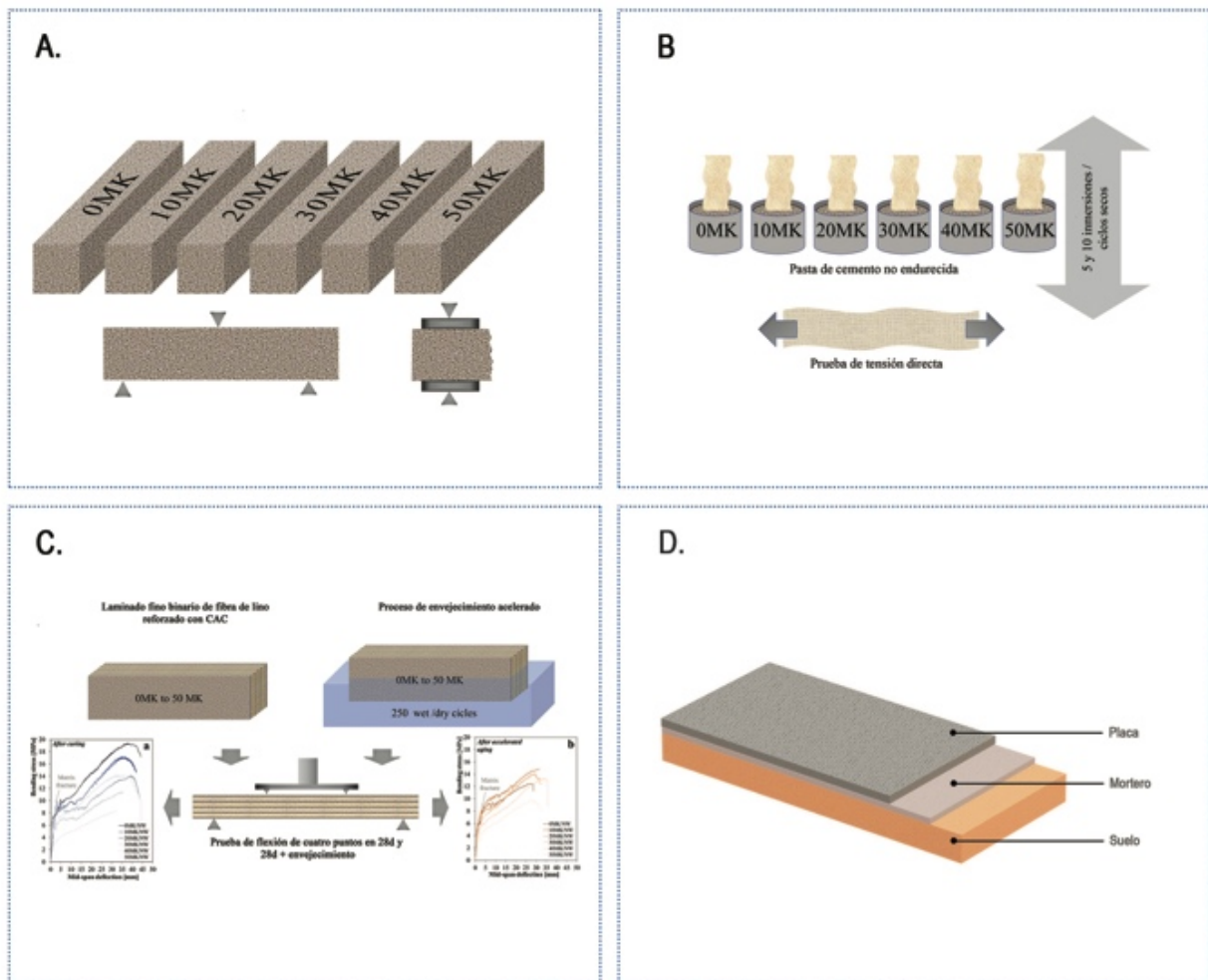


Figura III-1 Organización de la campaña experimental. Fuente: Elaboración propia.

- B. Ensayos destinados a estudiar la durabilidad de las fibras en pasta de CAC; analizando la degradación de las fibras extraídas de las pastas sometidas a 5 y 10 ciclos de inmersión en pasta de cemento y secado, siendo evaluadas a tensión (texturómetro) y observadas microscópicamente.
- C. Ensayos destinados a estudiar las propiedades mecánicas de las probetas reforzadas con el fieltro de fibra vegetal, con o sin tratamientos de envejecimiento acelerado, hielo deshielo, entre otros ensayos requeridos para una posible aplicación.
- D. Por último un ensayo en tiempo real, donde se ha puesto en funcionamiento una posible aplicación para pavimento.

Los especímenes a ensayar se han preparado con unos materiales en específicos, en este caso un fieltro de fibra vegetal de lino, Cemento Aluminato de Calcio (CAC) y Metacaolín (MK) en diferentes dosificaciones que van desde 0 % MK hasta 50 % MK.

### III.2 Objetivos de la campaña experimental.

El objetivo general de este trabajo consiste en desarrollar compuestos cementicios altamente dúctiles y duraderos, basados en refuerzo textil de fibras naturales (fieltro de lino), una matriz basada en aluminato de calcio y un aditivo puzolánico.

De acuerdo con el apartado anterior II.4 en esta hipótesis establecemos una alternativa adicional para mejorar la durabilidad del compuesto cementicio, que consiste en la utilización de un cemento sin hidróxido cálcico (uno de los responsables de la degradación de las fibras), en este caso utilizamos el CAC.

Debido al alto costo del CAC, que se usa más comúnmente en aplicaciones no convencionales, también se estudia su sustitución parcial por un material puzolánico (metacaolín). El metacaolín (MK) es un material puzolánico alternativo de alto rendimiento que presenta una menor huella de carbono que el cemento [95], por lo tanto, es una mezcla interesante para lograr un menor costo y una mayor sostenibilidad de los compuestos basados en CAC.

El uso del Metacaolín en esta campaña se debe a dos situaciones concretas; 1- la alta disponibilidad de este material en el laboratorio 2- para abrir un campo de estudio a este material que ha sido poco estudiado en la bibliografía científica.

### III.3 Normativa aplicable.

Para el desarrollo de esta campaña experimental, se buscaron normativas que regularan los ensayos a realizar en composites o materiales compuestos con fibras vegetales. AENOR, contempla el uso de fibra de acero y polipropileno en ensayos de hormigón, para una posible aplicación que en este caso es la de un pavimento también nos apoyamos en las normativas UNE para los ensayos de lugar.

Tabla III-1 Normativas aplicables a los ensayos realizados. Fuente: Elaboración propia

Ensayos	Normativa aplicada
Determinación de las características mecánicas (Matriz)	UNE-EN196-1:2005
Tiempo de fraguado	UNE-EN196-1:2005
Determinación de la consistencia normal	UNE-EN196-1:2005
Envejecimiento acelerado	UNE-12467:2013
Hielo-Deshielo	EN 1339:2003
Abrasión	EN 1339:2003
Determinación de las características mecánicas (material compuesto)	EN 1339:2003

### III.4 Materiales y métodos

Como materiales de partida se utilizaron materiales locales y de fácil obtención en las empresas europeas.

#### III.4.1 Cemento Aluminato de Calcio

El cemento es un conglomerante hidráulico formado por materiales que reaccionan con el agua, proporcionando un producto sólido, resistente y estable.

En este estudio se ha utilizado un Cemento de Aluminato de Calcio (CAC) con un contenido de alúmina del 41,5 %, proporcionado por Cementos Molins Industrial (Barcelona, España).

#### III.4.2 Metacaolín

El Metacaolín utilizado para el desarrollo de esta campaña fue suministrado por la empresa "ARCIRESA" cuyo, nombre comercial es (METACAOLIN PESER).

Tabla III-2 Composición química del CAC y Metacaolín. Fuente: Elaboración propia

Material	Wt % Contenido de componentes				Superficie específica de Blaine (m <sup>2</sup> /kg)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	
CAC	41.5	38.1	13.2	3.7	320
MK	39.4	0.1	1.4	54.7	1015

### III.4.3 Agua

La misión principal del agua utilizada para amasados es hidratar los componentes activos del cemento, a la misma vez que hace posible que la masa fresca de hormigón sea trabajable.

De acuerdo a la instrucción de Hormigón estructural (EHE-08) [138],[139], el agua utilizada para la fabricación del hormigón debe ser limpia y libre de un contenido de impurezas, tal que pueda producir alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en su fraguado y endurecimiento, reducciones en sus resistencias, ni peligros en su durabilidad. Así mismo, las aguas adecuadas para el amasado lo son también para el curado.

Para la elaboración de las mezclas se utilizó agua desionizada, recomendadas para el amasado de mortero, ya que si se utiliza otro tipo de agua puede tener impurezas, pudiendo provocar efectos adversos sobre el fraguado. Fue tomada de la red de suministro de los laboratorios de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (ESAB).

### III.4.4 Fluidificante

Para mejorar la fluidez de las pastas se utilizó un fluidificante Sika Viscocrete-3425, provisto por Sika S.A.U. (Barcelona, España). La dosis se calculó como el 0.2% del peso del aglutinante (CAC + MK).

### III.4.5 Desencofrante

Para evitar la adherencia de las matrices a los moldes y facilitar el desmoldado se utilizó un desencofrante Sika LN, suministrado por la empresa Sika España.

### III.4.6 Fibra.

Las fibras naturales utilizadas para preparar el refuerzo fueron fieltro de fibra de lino, proporcionadas por Fibers Reserche Development del Technopole de l'Aube en Champagne (Troyes, Francia), con una longitud promedio de 60 mm. Las fibras se enredaron en forma de telas no tejidas, de aproximadamente 2 mm de espesor y 275 g/m<sup>2</sup> de peso, de acuerdo con el procedimiento según los trabajos de Ardanuy et al. [140].



### III.5 Procesos de fabricación y tratamientos experimentales.

#### III.5.1 Fabricación del fieltro.

La máquina de cardado DILO OUG-II-6 ubicada en el Departamento de ingeniería textil y papelera (ETSEIAT) de la Universidad Politécnica de Cataluña, está equipada con carda universal para tarjetas, solapa cruzada, alimentador de baterías y telar de punzonado con doble aguja.

Las fibras de lino se abrieron primero y se cardaron para formar una red delgada, que se colocó mediante el método de colocación cruzada para formar bloques. Estos bloques se consolidaron en la máquina de punzonado para formar las esteras no tejidas [99].

Al momento de ser recibida, se procedió al marcado, cortado y selección de las láminas que estuviesen más homogéneas, puesto que algunas de estas presentaban ya sea por defecto de confección o movimiento de las fibras unos espacios, donde se podía apreciar carencia de fibras.



Figura III-2 Equipo de fabricación del fieltro. Fuente: Elaboración propia.

#### III.5.2 Características del fieltro.

Tabla III-3 Propiedades del fieltro de fibra de lino. Fuente: Elaboración propia

Propiedades del fieltro de fibra de lino	
Fibra	Linum usitatissimum
Color	Crema
Longitud, mm	12 mm aproximado
Diámetro de las fibras	275 micras

### III.5.3 Cornificación fieltro.

Para el desarrollo de esta tesis doctoral, se cornificaron un total de 300 láminas de fieltro de fibra.

#### o *Tratamiento de lavado y secado*

1. La manta de fibra obtenida se marca con recuadros de 32 x 32 cm.
2. Se cortan los recuadros (se corta con esta medida para una vez completados los ciclos, ajustar las muestras a las dimensiones del molde, puesto que en estos ciclos sufre deformaciones).
3. Se sumergen gradualmente en un recipiente con agua limpia. Las fibras deben absorber toda el agua posible y cambiar de color (se repite hasta completar con cada una de las láminas).
4. Se deja reposar durante 24 horas para obtener un resultado más óptimo.
5. Se retira el excedente de agua y se presionando manualmente para retirar el exceso.
6. Se colocan en láminas de papel secante cubiertas por ambas caras. Para facilitar y agilizar el

proceso colocábamos 5 capas por grupos.

Finalmente se colocan los grupos de fibras en un recipiente adecuado y se introducen en la estufa ventilada con una temperatura de 60 - 65 °C durante un periodo de ente 18 - 24 horas aproximadamente.

Este proceso se repite 5 veces para cada ciclo, es decir; 5 ciclos sometidas a lavado y 5 ciclos a secado.

Se puede observar que a medida que se va lavando el agua se va tornando más cristalina al igual que el papel secante, cada vez luce menos manchado Figura III-3 f, g, i.

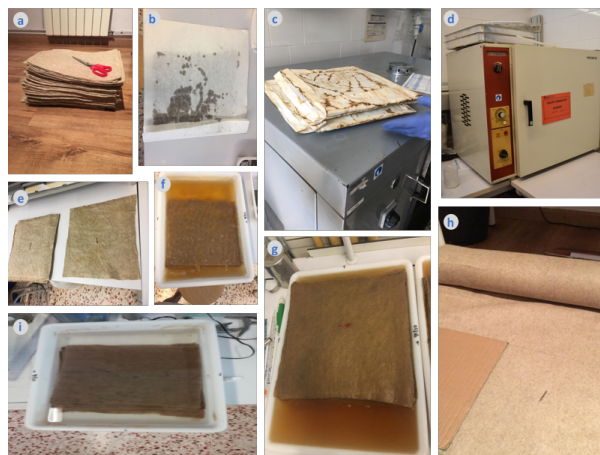


Figura III-3 Proceso de cornificación de la fibra; (a) fieltro cortado 32cmx32cm (b) fieltro en papel de filtro (c) fieltro con un ciclo de secado (d) estufa (e) fieltro cornificado (f)segundo ciclo de lavado del fieltro (g) primer ciclo de lavado (h) marcado en el

*rollo de fieltro(i) quinto ciclo de lavado. Fuente: Elaboración propia.*

Para llevar a cabo este proceso se utilizaron dos estufas ubicadas en los laboratorios de la Escuela Superior de Agricultura.

Al finalizar este proceso, se ajustan las láminas de fibras a las dimensiones del molde que utilizaremos, en este caso se corta nuevamente en su tamaño final de unos 30 x 30 cm, que eran las dimensiones necesarias para el desarrollo de la mayoría de los ensayos que se iban a realizar.

Cada lámina fue marcada con una flecha indicando la dirección en que estaban orientadas las fibras para, en el momento de ser colocadas en la fabricación del compuesto, obtener unos resultados óptimos.

### **III.6 Procedimiento para la fabricación de probetas para los ensayos mecánicos de la matriz**

Para poder comprobar cuáles son las propiedades mecánicas de las composiciones de matrices propuestas se

prepararon un total de 54 probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Por cada composición estudiada se han dejado curar a 7, 28 y 56 días ( $20 \pm 1^\circ\text{C}, > 90 \text{ HR}$ ) para analizar la evolución de sus propiedades respecto al tiempo de curado. Las pruebas mecánicas se realizaron de acuerdo con la norma UNE – EN-196-1 pruebas en los modos de flexión y compresión.

Los materiales utilizados en el desarrollo de esta campaña fueron:

- Cemento aluminato de calcio electroland (EN 14647) CAC.
- Metacaolín MK.
- Fludificante SIKA.
- Desencofrante SIKA.
- Papel de filtro.
- Agua desionizada.

Los instrumentos utilizados para la fabricación de las probetas fueron:

- Mezclador mecánico.
- Espátula.
- Molde.

En primer lugar, se preparó la pasta con las diferentes dosificaciones estudiadas ver Tabla III-4 con una relación a/c 0,3 y peso total de cemento y material puzolánico de 1,5 Kg y 0,45 Kg de agua desionizada,

suficiente para llenar un molde. De cada molde obtendremos tres probetas.

El peso final de la pasta debe ser  $1,95 \text{ Kg} \pm 0,08 \text{ Kg}$ .

En algunas de las composiciones fue necesario añadir dos o tres gotas de fluidificante (que no fueron tomadas en cuenta en el peso final), debido a que la mezcla era demasiado densa, complicando la manipulación de la pasta.

Mezclados los materiales de partida, con el molde limpio, debidamente ensamblado y con un papel de filtro colocado en el fondo e impregnado por todos lados de desencofrante para poder desmoldar fácilmente, se procede a verter la pasta en cada una de las divisiones. Se enrasan con ayuda de una espátula y se le dan unos 60 golpecitos en una máquina de compactación para extraer el posible aire de la mezcla.

Ya listo, se cubre el molde con un plástico. Una vez listas, luego de dejarlas por aproximadamente (24 horas), procedemos a desmoldar, identificar correctamente e introducir en la cámara de curado durante el tiempo establecido.

Tabla III-4 Dosificaciones para el ensayo rendimiento mecánico. Fuente: Elaboración propia

Composiciones porcentuales	CAC (kg)	MK (kg)	AGUA (kg)	Relación A/C
100 %	1,5	-----	0,45	0,3
90-10 %	1,35	0,15	0,45	0,3
80-20 %	1,20	0,30	0,45	0,3
70-30 %	1,05	0,45	0,45	0,3
60-40 %	0,92	0,60	0,45	0,3
50-50 %	0,75	0,75	0,45	0,3

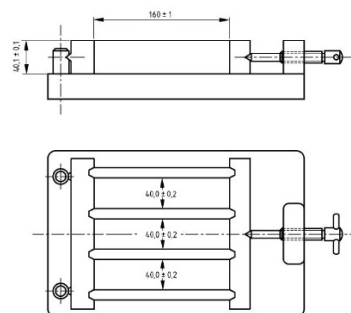


Figura III-4 Molde para probetas de caracterización de la matriz. Fuente: UNE-196-1



Figura III-5 Elementos para las probetas a) Moldes de hierro utilizado para la fabricación de las probetas. b) moldes con probetas c) probetas identificadas.

### III.7 Procedimiento para la fabricación de las placas.

Las probetas fabricadas son de 300 x 300 x 10 mm<sup>3</sup>. para conseguir estas medidas se ha utilizado un molde adaptación de la caja *Hastcheck* utilizada por Savastano Jr[86] a partir del año 2000. Éste está fabricado con pletinas de acero inoxidable con un espesor de 9 mm. Está estructurado de la siguiente manera:

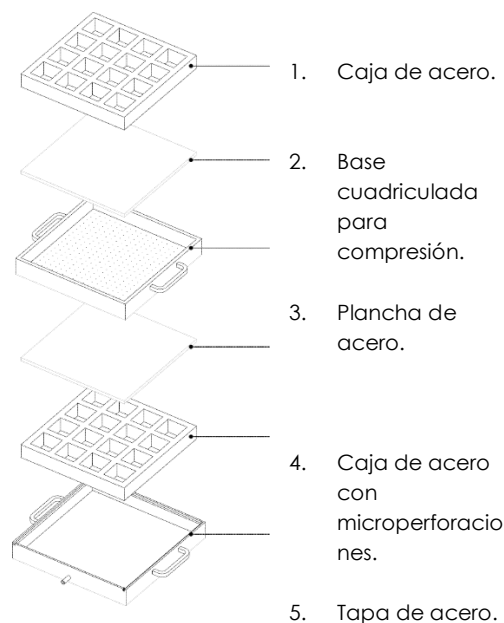


Figura III-6 Adaptación del sistema *Hastcheck*. Esquema de composición para elaboración del pane Fuente: A. Llerena.

De manera muy simplificada se explica el método de fabricación *Hastcheck*. Una suspensión muy diluida de cemento y fibras se coloca en un tanque de agitación constante. Mediante un rodillo tamiz el fibrocemento fresco es depositado en la banda transportadora, aquí se retira el exceso de agua de la mezcla mediante un sistema de vacío y se obtiene un “fieltro de fibrocemento”, con un espesor de 1 mm aproximadamente.

La banda transportadora deposita este fieltro en el cilindro acumulador, hasta obtener el grosor del tablero deseado.

Finalmente, el producto se deposita en una prensa para comprimirlo y curarlo. Todo el proceso es bastante rápido, por lo que el costo de producción es bajo[141].

Antes de empezar con la elaboración de cada placa es necesario preparar el molde. Este debe estar correctamente ensamblado, limpio de cualquier partícula y seco.

La caja baja debe estar seca y con una goma de estanqueidad debidamente colocada para evitar la filtración del aire en el momento del vacío.

correctamente y se vuelve a colocar el desencofrante en el textil y los bordes.

### III.7.1 Relación agua-aglomerante

Como referencia de trabajos anteriores, Pellecier et al. [142], [143], establecen que la cantidad mínima de agua requerida para la hidratación del cemento, es un 23,5 % del peso del cemento, es decir, una relación 0,235/1 (agua, cemento). A partir de ello debemos considerar la cantidad de agua que absorberá la fibra.

Tabla III-5 Dosificación de la pasta de la matriz. Fuente: Elaboración propia.

Nombre probeta	Aglomerante inicial	CAC	MK	Agua inicial	Pasta total	a/c inicial	Resto de pasta	Pasta en placa	Cemento en placa	Agua en placa inicial	Agua extraída	Agua en placa final	A/C final	Fibra	% fibra
100-0	2500	2500	-	2050	4550	0.82	1521	3029	1664.3	1364.7	740.8	623.9	0.37	65.15	3.91%
90-10	2500	2250	250	2050	4550	0.82	1634	2916	1602.2	1313.8	665.09	648.7	0.40	65.3	4.08%
80-20	2500	2000	500	1850	4350	0.74	1699	2651	1523.6	1127.4	478	649.4	0.43	65.15	4.28%
70-30	2500	1750	750	2000	4500	0.8	1576	2924	1624.4	1299.6	507	792.6	0.49	65.15	4.01%
60-40	2500	1500	1000	2100	4600	0.84	1620	2980	1619.6	1360.4	603.41	757.0	0.47	65.15	4.02%
50-50	2500	1250	1250	1350	3850	0.54	1589	2261	1468.2	1350.0	643	707.0	0.48	65.2	4.44%

En la caja superior, que está compuesta por la placa microperforada, colocamos un textil que permite que el agua se cuele mas no la pasta, facilitando así el vacío, la impregnamos del desencofrante para facilitar el desencofrado.

Se conecta la boquilla al compresor, se verifica que el vacío se haga

Se debe tener en cuenta que la fibra utilizada será seca y por lo tanto, debemos agregar una cantidad razonable de agua que permita homogeneidad, nos ayude con la trabajabilidad de la mezcla y que penetre adecuadamente en el fieltro.

Savastano Jr. en su trabajo "The use of coir fibre as reinforcement to portland cement

mortars" utilizó una relación a/c de 0,75 [144]. En ese entonces recomendaba tratar de reducir este valor. Posterior a este se han establecido otros valores dependiendo de los materiales de partida a utilizar.

En este ensayo partiremos de una relación agua cemento establecida, y tras realizar la succión por vacío, la extracción por compresión y el sobrante de la pasta determinarán una relación a/c más acertada.

Cabe destacar que para la fabricación de las probetas se hace una compresión constante para todas las piezas de 30 tn.

Cada material puede tener unas características particulares que permitan que uno retenga más agua que otra, por eso vemos que la relación a/c final no es la misma para todas las muestras.

### III.7.2 Enmoldado de la placa.

Listos todos los materiales y correctamente mezclados, procedemos al armado de la placa.

1. Se vierte una capa fina de aproximadamente 2 mm en el molde previamente preparado

(adaptación de la caja Hastchek). Con ayuda de una espátula se extiende por todo él y se filtra con la bomba de vacío durante aproximadamente 10 segundos para eliminar el exceso de agua.

2. Se vierte  $\frac{1}{4}$  de la mezcla en una bandeja de aluminio. Se introduce una lámina de fieltro (cornificada) y se impregnan con ayuda de un rodillo de la pasta de cemento.
3. Realizado esto, se coloca una lámina no tejida impregnada en el molde, tomando en cuenta la orientación de la fibra. Este paso se repite con todas las láminas. Con ayuda de una espátula, se va presionando al mismo tiempo que se va realizando el vacío.

Cabe destacar que cada lamina se va colocando en orientación cruzada.

Finalmente, agregamos otra capa de unos 2 mm aproximadamente de la mezcla, hacemos unos 5 segundos de vacío (sin dejar secar mucho) y colocamos una placa de metacrilato extruido (con desencofrante aplicado para facilitar el desmolde final) y tapamos

con la plancha de acero inoxidable el molde.

Después de terminar este proceso, el material compuesto se compacta durante 10 minutos con una presión de 3.5 MPa.

Para compactar las placas no se ha utilizado el método por golpes de la mencionada norma UNE 196-1:2005 de ensayos de cementos porque la fibra vegetal rebota y la masa no expulsa el aire que se produce durante el proceso de amasado.

Se ha utilizado una prensa hidráulica ubicada en las instalaciones de los laboratorios de ESAB, provista de una célula de carga de 30 tn, configurada con una rampa de subida a una velocidad de 0,50 mm/min.

Llegado a este valor se apagan el programa y equipo, y se deja comprimido por 24 horas. Trascorridas las 24 horas se procede a bajar la rampa y se desmolda la pieza, colocándola en la cámara de curado por 28 días a una temperatura de  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  y a 95 -100 % de humedad relativa.

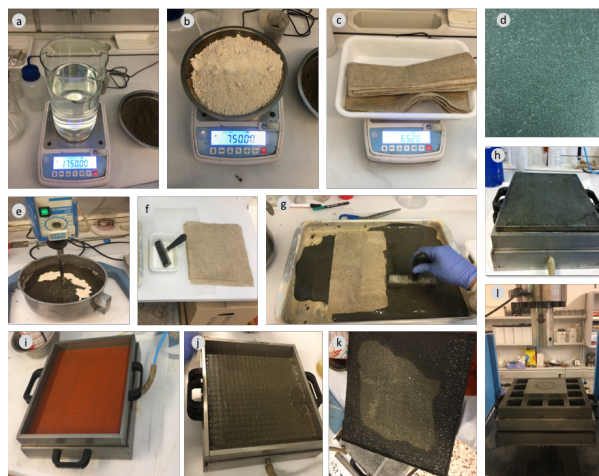


Figura III-7 Preparación de las muestras compuestas. (a), (b) y (c) Pesaje de materiales de partida. (d) placa de metacrilato extruido (e) Mezcladora con materiales (f) Rodillo y fieltro ya cornificado (g) fieltro impregnado en pasta de cemento (h) Molde listo para comprimir y extraer exceso de agua (i) Molde listo para verter y armar el panel (j) molde con primera capa de pasta de cemento (k) placa lista para introducir a la cámara de curado (l) Molde listo para comprimir por 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

## III.8 Campaña experimental.

### III.8.1 Estudio de la matriz

Para conocer el comportamiento de la matriz se han estudiado:

- Medida del pH en el tiempo.
- Determinación del tiempo de fraguado por el método Vicat.
- Resistencia mecánica según norma EN 196-1: 2005.
- Microdureza Vickers
- Análisis químico mediante DRX
- Microestructura mediante BSEM



### III.8.1.1 Medida del pH

El pH es la unidad de medida que describe el grado de acidez o alcalinidad de un producto o material.

Tabla III-6 Dosificaciones empleadas para la determinación del pH. Fuente: Elaboración propia.

Composiciones porcentuales	CAC (g)	MK (g)	Agua (g)
100%	500	-----	1000
90-10%	450	50	1000
80-20%	400	100	1000
70-30%	350	150	1000
60-40%	300	200	1000
50-50%	250	250	1000

Estas pastas son vertidas en unos botes correctamente identificados.

El instrumento utilizado para el desarrollo de este ensayo fue un pH meter BASIC 20 Crison.

En este ensayo, se analizaron un total de 7 muestras, que incluían las composiciones estudiadas descritas en Tabla III-7 y una mezcla de cemento portland, como prueba comparativa.

La nomenclatura empleada en este ensayo era la siguiente:

- En el caso de la prueba con el contenido de 100 % de Cemento

Aluminato de Calcio, la identificábamos con la abreviatura de la mezcla; es decir CAC.

- A la composición con un contenido de 100 % de contenido de Cemento Portland; CP.
- Las demás composiciones eran identificadas con el porcentaje de la mezcla, es decir, 90/10, donde 90 correspondía a la cantidad porcentual de contenido de CAC y 10 al MK, hasta llegar al 50/50.

figura III-8 Equipos para las pruebas de medidas de pH. (a) composiciones a ensayar (b) pHmetro (c) toma de medida a composición.



Antes de realizar cualquier medida, el pH metro era calibrado mediante soluciones tamponadas de calibración.

Cabe destacar que cada vez que realizamos una medida, debemos lavar con agua desionizada y secar bien, fijándonos de que el sensor no quede impregnado de pasta de cemento y esté totalmente limpio para poder seguir tomando las demás medidas.

A estas pastas se le tomaron varias medidas para poder sacar una media y poder registrar el valor obtenido de cada composición en el apartado de los resultados.

### III.8.1.2 Microdureza Vickers

Se define como dureza a la resistencia de un material a ser rayado, de igual forma se puede decir que es la resistencia de un material a ser penetrado.

La prueba de dureza de indentación es un método adecuado para investigar las propiedades mecánicas de un pequeño volumen de materiales[145].

Para los ensayos de microdureza Vickers, se utiliza un microdurómetro Duramín, ver en la foto III.9 h. Este aplica cargas de hasta 250 kgf. Posee incorporado un microscopio de medición, el cual mediante un software nos proporciona las medidas obtenidas durante cada indección.



Figura III-9 Materiales y elementos para ensayo: a) composiciones, b) pHmetro Cricson, c) toma de medida de pH a muestra. Fuente: Elaboración propia.

El ensayo consiste en por medio de un indentador de diamante en forma de pirámide de 4 caras penetrar la superficie de cada una de las probetas, realizando un total de 25 punzadas en cada una.



Figura III-10 Indentador piramidal Vickers.

Se ensayarán un total de 6 probetas correspondientes a las dosificaciones detalladas a continuación.

Para determinar dichos valores la fórmula a utilizar es la siguiente:

$$HV = \frac{P}{A} = \frac{\alpha P}{d^2}$$

Donde HV se define como la relación de la carga aplicada, p; al área de contacto piramidal, A; de la muesca. Donde d es la longitud de la diagonal de la impresión resultante y  $\alpha = 1.8544$  para el indentador Vickers.

Para la elaboración de estas probetas se utilizan unos moldes de silicona y se preparan un total de 50 g de mezcla con las dosificaciones siguientes:

Tabla III-7 Dosificaciones empleadas para el ensayo de Microdureza Vickers. Fuente: Elaboración propia.

Composiciones porcentuales	CAC (g)	MK (g)	Agua (g)	Relación A/C
100%	50	---	15,5	0,31
90-10%	45	5	16,5	0,33
80-20%	40	10	17,5	0,35
70-30%	35	15	17,5	0,35
60-40%	30	20	18,0	0,36
50-50%	25	25	19,0	0,38

1. Se pesan las materias primas y se procede a mezclar. En este caso utilizamos la mezcladora Zhermack Elit Mix Vacuum Mixer Figura III-9c para evitar el aire en muestras.
2. Se vierte la pasta en cada uno de los moldes. Antes de verter se le aplica una capa de desencofrante en spray Figura III-9g.
3. Tras 12 horas se procede a desmoldar e identificar, y son llevados a la cámara de curado por un período de 7 días.
4. Transcurrido el tiempo de curado, las muestras son pulidas con lijas de agua, empezando por la numeración 500 seguida de las 800, 1200 y 2500 micras en la pulidora Struers Figura III-9f.
5. Finalmente se pule con la suspensión monocristalina de diamante y pasta, de la casa comercial MetaDi de Buehler de 6, 3 y 1 micra (figura III.9 d).

Ya listas y pulimentadas cada una de las probetas, se configura el durómetro con una presión de carga de 19,6 N, que es el máximo de carga con un objetivo de 10x.

Cabe destacar que las cargas con las que se efectúa este ensayo van desde 19.6 N hasta 98.07 N.

Se toman las 25 medidas a cada una de las muestras, utilizando una grilla de 100  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$ .

### **III.8.1.3 Determinación del tiempo de fraguado por el método Vicat.**

Para realizar este tipo de ensayo, apoyados en la norma UNE196-1:2005 determinamos la consistencia normal. Este tipo de prueba nos permite conocer la cantidad de agua necesaria que se debe agregar a un peso de cemento para obtener una consistencia normal de la pasta y facilitar la manejabilidad de esta. La determinación de esta consistencia nos sirve como referencia para las pruebas de tiempo de fraguado.

Los materiales y equipos utilizados tanto para la consistencia normal como para el tiempo de fraguado fueron:

- Cemento (CAC y MK 500 g).
- Balanza de 0.1 g de precisión.
- Mezcladora Zhermack Elite Mix
- Cuchara de aluminio.
- Guantes.
- Cronómetro.

- Espátula metálica.
- Aparato Vicat: compuesto por un soporte con un vástago móvil que pesa 300 g.

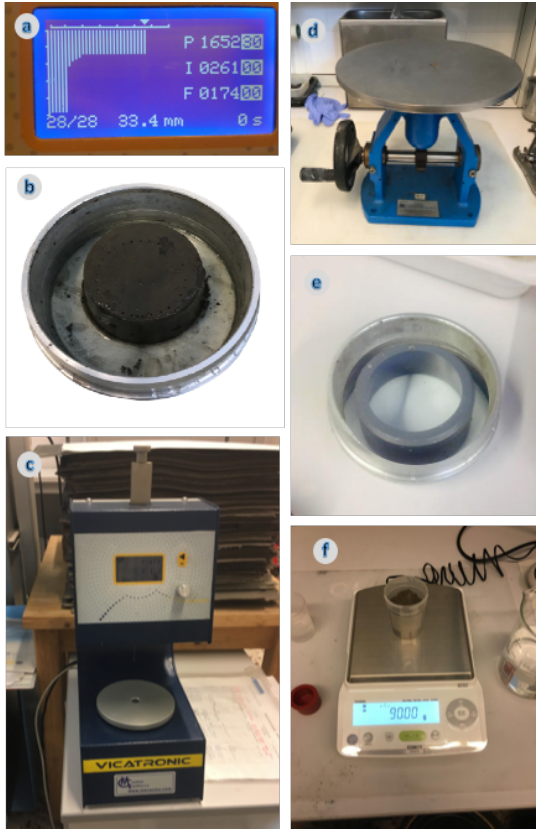


Figura III-11 Herramientas utilizadas para realización el ensayo de tiempo de fraguado (a) pantalla con medidas tomadas (b) probeta (c) aparato vicatronic (d) compactador manual (e) molde (f) pesaje de material. Fuente: Elaboración propia.

Uno de sus extremos se llama sondeo, tiene 10 mm de diámetro y 50 mm de longitud y el otro una aguja de 1 mm de diámetro, el vástago es reversible y se ajusta mediante un tornillo, rígidamente unido al soporte.

El molde donde se coloca la pasta es de forma tronco-cónica y su base mayor reposa sobre una placa de vidrio.

Una vez pesados los materiales, mezclados y siguiendo la normativa aplicada, se procede a verter la pasta en el molde (Figura III-11e) debidamente preparado, y ponemos en marcha el equipo (**¡Error! No se encuentra el origen d e la referencia.c).**

El tiempo de duración desde el momento de preparación de la mezcla y la toma de la lectura es de unos 4 minutos.

La consistencia normal se obtiene cuando la aguja penetra 10 mm en la muestra. Para esta parte se ensayaron un total de 18 probetas hasta tener la dosificación adecuada.

La nomenclatura aplicada para cada probeta fue;

C = (donde la C se refería a la palabra consistencia). Seguida de una numeración que se refería a la composición estudiada:

C1= C Consistencia y el 1 hacía referencia a que era una mezcla con 10 % de MK.

C2= C Consistencia y 2 hacía referencia al 20 % de MK.

A partir de este ensayo, tomamos la siguiente dosificación (Tabla III-8) como la definitiva para las pruebas de determinación del tiempo de fraguado.

Tabla III-8 Composición porcentual dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia.

Composiciones porcentuales	CAC (g)	MK (g)	AGUA (g)	Relación A/C
100 %	500	---	155	0,31
90-10 %	450	50	165	0,33
80-20 %	400	100	175	0,35
70-30 %	350	150	175	0,35
60-40 %	300	200	180	0,36
50-50 %	250	250	190	0,38

La determinación del tiempo de fraguado de los cementos se realiza prácticamente en todo el mundo por el método de Vicat, por medio del cual se mide la resistencia que ejerce una pasta de cemento a lo largo del tiempo, amasada solamente con agua, a la penetración de una aguja de 1 mm<sup>2</sup>.

El objetivo de este ensayo es determinar el tiempo inicial y final de fraguado de una pasta de cemento y sus diferentes vertientes.

El fraguado no es más que el paso de estado de una mezcla o pasta de fluido a

sólido. En este proceso vemos dos tiempos de fraguados; el inicial y el final.

El fraguado inicial es el tiempo que pasa desde que el cemento entra en contacto con el agua hasta que deja de ser plástica y pierde fluidez.

El fraguado final es el tiempo desde que termina el fraguado inicial hasta que la pasta o mezcla empieza a ganar cierta resistencia (endurecer).

En el tiempo de fraguado intervienen algunos factores como son:

- La relación agua/cemento que tenga la mezcla. Mientras más líquida sea la pasta, más tardará el tiempo de fraguado debido a su fluidez y tardará más tiempo en perderla.
- La temperatura del ambiente, entre más alta sea la temperatura del entorno, más rápido perderá fluidez la pasta y se secará el agua.
- El grado de finura del cemento afecta de forma que se necesitará más agua para hidratar todas las partículas.
- La humedad relativa, si la saturación de humedad es baja el ambiente

intentará quitarle la humedad a la pasta y secarla más rápido.

El procedimiento a seguir fue el siguiente, ya listas las mezclas, vertidas en el molde procedemos a realizar una compactación manual para evitar las burbujas de aire durante 5 segundos aproximadamente, y a enrasarlas con ayuda de una espátula hasta dejar la cara vista completamente lisa y plana.

Se lleva al aparato el molde con la pasta y antes de poner en marcha el equipo colocamos agua hasta cubrirlo completamente para crear una especie de cámara húmeda.

Se pone en marcha el equipo, que ha sido previamente programado con unos tiempos de retrasos establecidos de acuerdo a las mezclas a experimentar. Finalmente, transcurrido este tiempo, el ensayo empieza a hacer las medidas, realizando un total de 86 penetraciones en un tiempo establecido.

El tiempo total de ensayo desde el momento de empezar a mezclar los componentes hasta la puesta en el equipo fueron de unos 3-4 minutos como máximo.

La nomenclatura aplicada para cada probeta era;

V = (donde la V se refería a la palabra Vicat). Seguida de una numeración que se refería a la composición estudiada:

VCAC= V Consistencia y el CAC hacia referencia a que era una mezcla con un contenido de 100% de CAC.

V1= V Vicat y 1 hacía referencia al 10 % de MK.

#### **III.8.1.4 Resistencia mecánica.**

Una vez listas y curadas, se proceden a ensayar; en este caso ensayaremos en tres fases 7, 28 y 56 días.

En primer lugar, haremos las pruebas de flexión de tres puntos en la prensa hidráulica de multiensayo Incotècnic, ubicada en las instalaciones de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona ESAB. Basadas en la normativa UNE-EN 196-1.

Para ese ensayo, la prensa se configuró con una célula de carga de 3 kN, a una velocidad de ensayo de 1mm/min con una precarga de 3kg.

Luego de realizadas las pruebas de flexión, se obtenían dos trozos de cada probeta ensayadas con los cuales se ensayaron a compresión en la misma prensa hidráulica multiensayos.

Para los ensayos de compresión, la prensa se configuró con una célula de carga de 20 kN, puesto que en estos tipos de ensayos la resistencia es mucho más elevada y la misma velocidad que la anterior (1 mm/min).

Con los resultados obtenidos, se ha realizado un análisis estadístico (Anova) con una separación de media por el método Tukey HSD con ayuda de un software SAS GLM.

#### **III.8.1.5 Composición química.**

La composición química se determinó mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro modelo X'Pert PRO MPD DY-3197 (PANalytical, Países Bajos).

Los pasos para la realización de este ensayo fueron:

1. Luego de las pruebas ser sometidas a las resistencias mecánicas, los restos fueron triturados con un mortero. El

polvo resultante era vertido en un embudo (Figura III-12b) al cual le colocábamos papel de filtro y este a su vez conectado a la máquina de vacío se le realizaban los dos procesos siguientes;

2. Las reacciones de hidratación se congelaron mediante una inmersión de 20 segundos en acetona, seguido de un lavado en isopropanol. Las muestras se mantuvieron en condiciones de vacío hasta su análisis.

El total obtenido era aproximadamente unos 10 g de polvo de cada una de las dosificaciones estudiadas que iban desde 0% Mk hasta 50% Mk.

3. Los datos fueron recolectados en el rango de  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $40^\circ$  con una resolución de  $0.02^\circ$  y una velocidad de  $1 \text{ s} / 0.02^\circ$ .





Figura III-12 Equipamiento para las pruebas a) cámara de vacío (b)embudo (c) compresor (d)mortero. Fuente: Elaboración propia.

### III.8.1.6 Microestructura.

La microestructura de las muestras encapsuladas y pulidas se analizó mediante imágenes de electrones retrodispersados (EEB) realizadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo JSM-6300 (JEOL, Japón), equipado con un dispersor de energía X-Espectrómetro de rayos (EDS) modelo Link ISIS-200 (Oxford Instruments, Reino Unido)

para análisis EDS, el cual utiliza electrones en lugar de luz para formar imágenes de alta resolución imposible de obtener con un microscopio óptico.

El SEM cuenta con un dispositivo que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y después, con diferentes detectores, se recogen los electrones generados de la interacción con la superficie de la muestra para crear una imagen que refleje sus características superficiales y que proporcione información sobre su forma, textura y su composición de elementos químicos.

Como requisito para el desarrollo de este ensayo se requiere que las muestras sean conductoras y estar perfectamente secas.

El procedimiento que detallaremos a continuación, se les aplica a las probetas con las dosificaciones estudiadas en la siguiente tabla:

Tabla III-9 Dosificaciones estudiadas en la microscopía electrónica de barrido BSEM. Fuente: Elaboración propia.

Composiciones estudiadas
100% CAC
90% CAC 10% MK
80% CAC 20% MK
70% CAC 30% MK
60% CAC 40% MK
50% CAC 50% MK

Este estudio se realiza con restos de las probetas anteriormente ensayadas con las diferentes dosificaciones estudiadas en este trabajo, tanto a 28 días como a 56 días.

Para el desarrollo de este estudio se siguieron estos pasos:

1. En primer lugar, se extraen las piezas que han sido identificadas y conservadas en isopropanol.
2. Se someten a cortes con ayuda de la maquina cortadora de muestras de los laboratorios de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (ESAB).

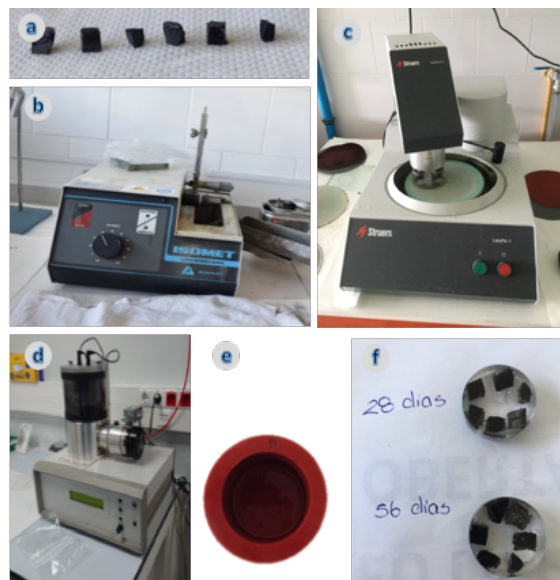


Figura III-13 Componentes de las prueba (a)muestras cortadas (b)Sierra (c)máquina de pulido automático (d)microscopio electrónico de barrido SEM e) molde de silicona 30mmx30mm (f) probetas encapsuladas en resina epoxi. Fuente: Elaboración propia.

3. Una vez secas e identificadas, se prepara una resina sintética derivada del epoxi intentando generar la menor cantidad de burbujas posible.
4. Se preparan los moldes de silicona (Figura III-13 e) de 30 mm x 30 mm con desencofrante de silicona en spray para ser introducidas cada pieza.
5. Se deja endurecer y al final obtenemos bloques de resina que contienen las muestras en su interior.

6. Se procede al pulimentado de los bloques con una secuencia de los grados de papel 400, 600, 800 y 1200 y la suspensión monocristalina de diamante y pasta de la casa comercial MetaDi de Buehler de 6, 3 y 1 micra. Para facilitar el pulimentado de estas se ha utilizado la máquina de pulido automático Labopol de la casa comercial Struers.

El equipo utilizado se encuentra en las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería industrial y audio visual de Terrasa, de la universidad Politécnica de Cataluña (ESEIAAT).

### **III.8.2 Durabilidad de las fibras en CAC.**

Este ensayo se realiza para conocer qué efecto ejerce la pasta de cemento en el fieltro de lino.

Dicho ensayo se llevó a cabo tanto en las instalaciones de los laboratorios de la escuela de Agricultura de Barcelona ESAB como en las de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrasa ETSEIAT en la cual se encuentra el microscopio de barrido SEM con un voltaje de 5 a 10 kV para observar el comportamiento final.

Para determinar el efecto de la composición de la matriz sobre el refuerzo de fieltro natural, las pastas de cemento con contenido variable de MK desde 0% hasta 50 %, se prepararon y mantuvieron bajo agitación durante 7 días para alcanzar la hidratación mientras se mantenía en condiciones viscosas; la relación a/c se fijó en 0,3.

Se sumergieron muestras de telas no tejidas de fibras de lino ( $20 \times 100 \text{ mm}^2$ ) en pasta de cemento hidratada sin endurecer durante 4 días, luego se enjuagaron con agua para eliminar las partículas de cemento y se secaron en un horno a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 3 días.

Después de 5 y después de 10 ciclos de remojo y secado, las telas no tejidas se caracterizaron por pruebas de tracción e imágenes SEM. Para la caracterización mecánica, se analizaron 10 muestras por muestra en modo de tracción en un analizador de textura TA.XTPLUS / 30 (Stable Micro Systems, Reino Unido), equipado con una celda de carga de 300 N, a una velocidad de  $1 \text{ mm s}^{-1}$ ) La imagen SEM se realizó en un equipo JSM-6300 (JEOL, Japón) observando la superficie de las fibras en la fractura de las

muestras sometidas a la prueba de tracción.

1. El ensayo lo dividimos en cuatro partes:
2. Preparación de la matriz líquida.
3. Ciclos seco-húmedo. (Escuela Superior de Agricultura de Barcelona UPC – BarcelonaTech).
4. Ensayo a tracción de las fibras de lino: Análisis de las fibras mediante microscopía electrónica de barrido (Scanning electrónico microscopio, SEM).

Para el desarrollo de estos puntos anteriormente mencionados se emplearon los siguientes materiales:

1. Cemento de aluminato de calcio Electroland (EN 14647 CAC) de Cementos Molins Industriales.
2. Metacaolín peser de ARCIRESA.
3. Filtro de fibra de lino, proporcionado por el grupo de Investigación en Tecnología Textil (TECTEX) de la Universidad Politécnica de Cataluña (Terrassa, Barcelona).
4. Agua destilada, proveniente de las red de distribución de los laboratorios de la Escuela Superior de Agricultura

de Barcelona (ESAB Castelldefels, Barcelona).

5. Microscopio electrónico JSM-5610 de Jeol.
6. Texturómetro TA.XTPLUS / 30 de Stable Micro Systems.
7. Agitador automática PW Overhead Stirrer de Velpa Científica.
8. Estufa (horno).

#### *Preparación de la matriz líquida*

Se procedió al pesaje de los materiales tanto los cementantes como los líquidos, con las combinaciones estudiadas que van desde un 0%Mk hasta un 50% Mk, con unas dosificaciones de agua elevadas para si permitir que la pasta no fraguara antes de finalizar el ensayo, manteniéndolo en constante agitación por un período de 7 días consecutivos.

#### **III.8.2.1.1 Ciclos seco-húmedo.**

Se cortan una tiras del fieltro de lino (20 × 100 mm<sup>2</sup>) impregnadas en pasta de cemento hidratada sin endurecer previamente preparada, sometiéndolas a ciclos seco/ húmedo.

Una vez listos y correctamente identificados los seis botes, se proceden a ser sometidos a los ciclos seco-húmedo.

El ciclo seco consistía; en colocar destapados los botes con las fibras sumergidas en las pastas en el interior de la estufa por tres días a una temperatura de 60 ° C.

El ciclo húmedo consistía; Luego de ser retiradas de la estufa, se proceden a hidratarlas con agua destilada y finalmente se mantenían hidratados durante 4 días. Completando una duración total de 7 días, realizándose cada uno de estos de forma consecutiva. Tres de los botes fueron sometidos a 5 ciclos secos, y las otras 3 fueron sometidas a 10 ciclos.

Al momento de completar el total de ciclos correspondientes, se someten a un lavado las fibras con agua destilada hasta retirar el máximo excedente posible de pasta de cemento, se introducen nuevamente a la estufa hasta eliminar la mayor humedad, luego de haber extraído el excedente de agua se cortan y son colocadas ya secas en una bomba de vacío para extraer el aire que puedan estas contener, así también como evitar la absorción de humedad del ambiente hasta ser analizadas.

### **III.8.2.2 Ensayo mecánico de las fibras de fieltro de fibra de lino.**

Finalizada la fase anterior de ser sometido a ciclos seco-húmedo en diferentes matrices de CAC y MK el fieltro de fibra de lino, analizamos la resistencia a tracción para ver el comportamiento de las fibras tras ser sometidas a estas acciones y comprobar que no afectaban a sus propiedades mecánicas.

Cada una de las tiritas de fieltro rescatadas en el proceso anterior se utilizó para recortar 10 tiritas más pequeñas, con

unas dimensiones de 1x4cm, para cada dosificación del mortero y para cada sucesión de 5 ciclos. De tal manera que obteníamos un total de 60 tiritas sometidas a 5 ciclos seco- húmedo y 60 más sometidas a 10, cada una debidamente rotulada y pesada.

El ensayo a tracción se llevó a cabo mediante un texturómetro del laboratorio de análisis de alimentos de la ESAB. Este consistía en ensayar cada tirita de fieltro de forma individual y a través de este aparato saber cuál era su resistencia a tracción. La célula de carga empleada

para este ensayo fue de 5 kN y la distancia entre las pinzas que sujetaban la tira de fieltro era de 10 mm.



Figura III-14 Fibra lista para ensayar en el texturómetro. Fuente: X Lozano 2017.

El software propio de la máquina nos aportaba toda la información sobre el estado del ensayo y nos permitía configurar su velocidad y la precarga inicial de la célula.

En la Figura III-14 se muestra el Texturómetro con una muestra preparada para ensayarse.

### III.8.2.3 Análisis de las fibras mediante microscopía electrónica.

La imagen SEM se realizó en un equipo JSM-6300 (JEOL, Japón) observando la superficie de las fibras en la fractura del Especímenes sometidos a la prueba de tracción.

Los restos de las tiras son llevadas a los laboratorios de la Universidad Politécnica

de Cataluña (Terrassa) correctamente identificadas y se procede a metalizar mediante un baño de oro, evitando el contacto con los dedos para que esta no sea contaminada de polvo u otros contaminantes y así permitir que el haz de electrones provenientes del microscopio atraviese la muestra y poder observar lo requerido para este ensayo.

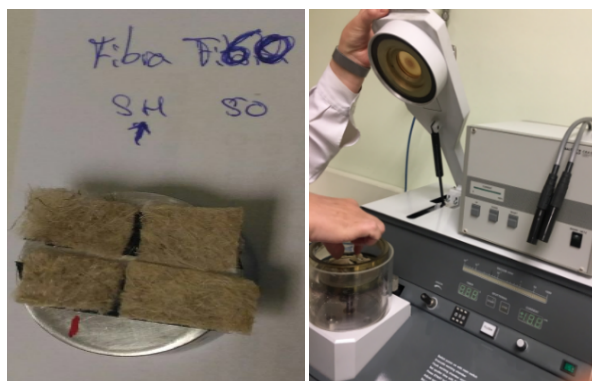


Figura III-15 Preparación de fibras para ser observadas por microscopía electrónica. Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de esta parte experimental estuvo a cargo de la técnica de dicho laboratorio quien metalizó, introdujo en la cámara y manipuló el microscopio.

Gracias a las imágenes proporcionadas por el microscopio electrónico podemos evaluar si las fibras que conforman el fieltro han sufrido algún tipo de degradación al estar en contacto con las matrices compuestas de cemento aluminoso y Metacaolín.

Se realizaron tres capturas de imagen para cada muestra de cada dosificación y ciclo seco-húmedo. Cada una de estas correspondía a unos aumentos concretos. Por ejemplo, de la muestra con la dosificación 50/50 y sometida a 10 ciclos seco-húmedo se realizaron dos capturas a 1000 aumentos, dos en 5000 y una en 50. Las más interesantes a la hora de apreciar posibles degradaciones son las hechas a 1000 y 5000 aumentos.

### III.8.3 Propiedades mecánicas y durabilidad de las placas.

#### III.8.3.1 Determinación del comportamiento mecánico.

Para el ensayo de determinación del comportamiento mecánico de las probetas, se ensayaron las resistencias mecánicas curadas a 28 días y luego de ser sometidas a los ciclos de envejecimiento acelerado y de hielo - deshielo.

Transcurrido el tiempo de curado (28 días), el ciclo envejecido acelerado y el ciclo hielo-deshielo, las placas son mantenidas en un ambiente de laboratorio por 24 horas.

Las probetas son marcadas y cortadas en una sierra de corte circular de dos discos, con sistema de enfriamiento por agua y graduación de velocidad para facilitar el corte.

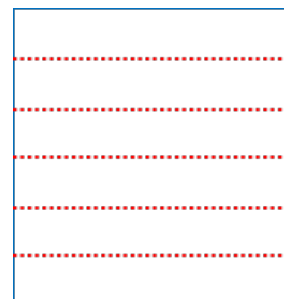


Figura III-16 Esquema de marcado para el cortado de la placa previo a su ensayo mecánico. Fuente: Elaboración propia.

Una vez listas las piezas, procedemos a tomar las medidas con ayuda de un pie de rey. Tomando en cuenta tanto el ancho como el espesor de estas para su posterior análisis y graficado.

Ya tomadas las medidas y correctamente identificadas (nomenclatura) procedemos a instalar en la prensa de multiensayos "Incotecnic" en los laboratorios de la Escuela superior de Agricultura la célula de carga que emplearemos en este ensayo, configurándola así para tomar los datos por el método de flexión a cuatro puntos con el sistema internacional. Los parámetros de ensayo fueron, velocidad de ensayo 4,00 mm/min, intervalo de

muestreo 0,25 s, límite superior de fuerza 0,200 tf y con una celda de carga de unos 5 kN.

Se van colocando las tiras (una por una) en la ubicación correcta y se procede a poner en marcha la rampa de subida, cuando veamos que esta tope a las barras o rodillos de la prensa ponemos a cero la pantalla y activamos el programa. Cuando escuchemos y veamos gráficamente la rotura entonces detenemos el equipo y procedemos con la siguiente pieza a ser ensayada hasta completar todas las muestras.

A estas probetas ensayadas se le determinó el módulo de elasticidad (MOE), el límite de proporcionalidad (LOP), el módulo de rotura (MOR).

### **III.8.3.1.1 Ensayos al material compuesto, apoyados en una posible aplicación para pavimentos.**

En busca de una posible aplicación concreta en un elemento constructivo, nos inclinamos por la aplicación en pavimentos exteriores por lo que conlleva un sin número de ensayos. Las pruebas quedaron sujetas a la disponibilidad de las

maquinarias necesarias en los laboratorios.

De la misma manera que hemos hecho en las matrices, en las flexiones también se ha realizado un análisis estadístico (Anova) con una separación de media por el método Tukey HSD con ayuda de un software SAS GLM.

### **III.8.3.2 Envejecimiento acelerado. (seco-húmedo).**

De acuerdo a la norma UNE 12467:2013, se desea lograr una categoría B, para lo cual las probetas deben ser sometidas a 25 ciclos de inmersión-secado. En este caso de estudio pudimos llegar a la categoría A, que requiere un mínimo de 50 ciclos.

El envejecimiento acelerado consistió en un total de 250 ciclos húmedo / seco



Figura III-17 Cámara climática para someter las probetas a ciclos de envejecimiento acelerado. Fuente: Elaboración propia.



realizados en una cámara climática automática CCI (CCI Calidad, España). Cada ciclo comenzó con una inmersión de 3 horas de las muestras en agua a 20 °C, seguido de un secado de 3 horas a 60 °C a 20 % de HR. Se analizaron un total de 6 muestras.

### III.8.3.3 Hielo-deshielo.

Para este ensayo, apoyados en la norma EN 1339:2003 de pavimentos y realizado en las instalaciones de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona ESAB se procedió ensayar un total de 6 probetas con las dosificaciones estudiadas que van desde 100 % CAC hasta un 50-50 % CAC y MK.



Figura III-18 Proceso del ensayo: (a) cámara climática (b) estructura para soporte de bandejas dentro de la cámara climática (c) probeta congelada (d) bandeja (e) montaje de probetas. Fuente: Elaboración propia.

Transcurrido 28 días en la cámara de curado, las probetas se acondicionan previamente en unos recipientes, cubiertas con una solución al 3 % de NaCl, correspondientes a 120 g de sal diluidas en 4 litros de agua y se someten a 28 ciclos de congelación -descongelación a una temperatura entre 18 a 20 grados, detallados de la siguiente manera:

- 30 minutos con una temperatura alcanzando los 20 grados.
- 30 minutos mas en 20 grados.
- 11 horas baja a -18 grados, se mantiene 2 horas en -18 grados.
- En 9 horas sube a 20 manteniéndose 1 hora y así sucesivamente se van repitiendo día tras días hasta completar el total de ciclos requeridos.

Completados 7 y 14 ciclos, durante el período de deshielo, se le añade mas agua de ser necesario para mantenerlas sumergidas con una capa de mas o menos 5 mm.

Al finalizar los 28 ciclos, cada probeta se limpia y se recoge el material desprendido en un papel de filtro, se limpia con un mínimo de un litro de agua para eliminar cualquier resto de solución, se deja en

reposo por al menos 24 horas y se procede a pesar la masa seca del material desprendido.

A modo general de los tres ensayos anterior descrito, las pruebas de flexión se realizaron con una máquina de prueba universal Incotecnic (Incotecnic Lab-Pre SL, España), equipada con una celda de carga de 3 kN y un dispositivo de doblado de 4 puntos con 270 mm de espacio de soporte y 90 mm de espacio de carga.

Las pruebas se realizaron a 5 mm / min. El módulo de ruptura (MOR), el límite de proporcionalidad (LOP), el módulo elástico (MOE) y la energía de fractura específica se determinaron a partir de las curvas. El MOR se definió como el valor máximo de estrés. El LOP se consideró como el valor de ruptura de la matriz (primer crack). El MOE se determinó entre 60% y 80% de la LOP.

Finalmente, la energía de fractura específica se calculó como el área bajo la curva de fuerza-desplazamiento, limitada a una desviación del 10% del tramo de soporte, dividida por la sección de la muestra. Los resultados fueron tratados estadísticamente como se mencionó anteriormente.

#### **III.8.3.4 Resistencia al impacto.**

Para la realización de este ensayo se siguieron las pautas de la norma UNE 127021: 1999 EX, que establece que: Las probetas estarán constituidas por las baldosas enteras, habiéndolas mantenido previamente en un mínimo de 48 h en el ambiente del laboratorio.



Figura III-19 Foto III 16 Probeta en lecho de arena lista para ensayar. Fuente: Elaboración propia.

En este caso ensayaremos un total de seis probetas, correspondientes a las composiciones estudiadas de CAC y MK, con variaciones de 0 % MK hasta 50 % MK. Deberán estar limpias de cualquier impureza o protuberancia.

El equipo está compuesto por:

- Plataforma o base de lecho de arena.
- Barra con soporte imantado.
- Una esfera de acero de (1000 g) de masa.

Para el desarrollo de este ensayo, se sitúa la baldosa en el centro del equipo, sobre el lecho de arena y gradualmente se va dejando caer la esfera de acero sobre la cara vista con una altura inicial de 600 mm.

i con esa altura de caída no se ha producido fisura en la baldosa, se dejará caer nuevamente sobre ella y se va aumentando gradualmente la altura de caída de 100mm en 100mm cada vez. Más, hasta conseguir la rotura de esta.

Cada impacto debe producirse a una distancia superior a 50 mm del impacto anterior y a más de 50 mm del borde de esta.

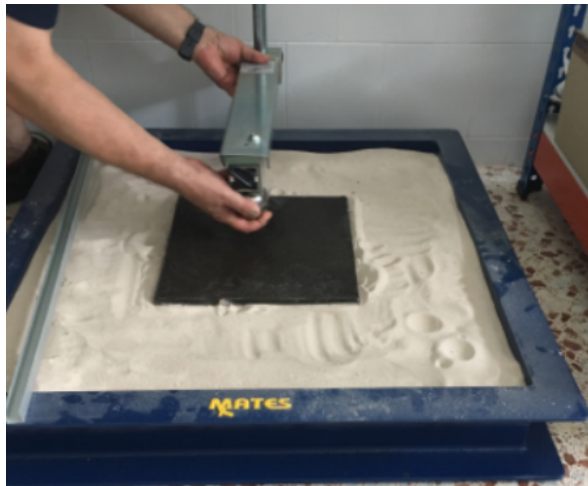


Figura III-20 Probeta ensayada con muestra de impacto. Fuente: Elaboración propia.

### III.8.3.5 Resistencia al Desgaste por abrasión.

La resistencia a la abrasión se determina midiendo el desgaste producido en la cara vista de la probeta, sometida a rozamiento mediante un disco de acero de 70 mm de anchura, y material abrasivo. El material abrasivo debe ser corindón blanco de grano 80 según Norma ISO 8486-1.

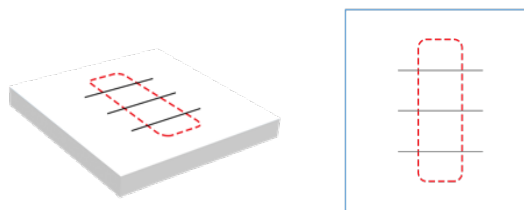


Figura III-21 Esquema de probeta a ensayar. Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-10 Parámetros para pavimentos. Fuente EN 1339:2003.

Requisitos	Terrazo exterior		Baldosa de hormigón, losas y losetas UNE 127022	
	Clase	Valor individual (mm)	Clase	Valor individual (mm)
Desgaste por abrasión	B	≤24	G	≤30
	D	≤20	H	≤23

Según la norma EN 1339:2003, para cumplir los requisitos para la posible aplicación, en este caso pavimento debe cumplir los siguientes parámetros detallados en la Tabla III-10.

Las piezas previamente elaboradas y curadas se procedieron a cortar en una sierra de corte con dimensiones de: 10 x 10 cm.

Listas las piezas y correctamente identificada se procedieron a ensayar 6 piezas correspondientes cada una a las composiciones estudiadas. La huella que se generaba en la pieza era marcada con ayuda de un lápiz y siguiendo la normativa se tomaban los valores para obtener los resultados finales.



Figura III-22 Sierra para cortar las probetas.

La superficie de la probeta deberá ser lisa. En nuestro caso, nuestra probeta en la parte superficial presentaba rugosidad o textura. Como nuestro panel está compuesto tanto en la parte superficial como en la base de la misma manera, ensayamos la parte lisa. Para facilitar la lectura de la huella, una vez limpia, cubrimos con una pintura acrílica de color blanco.

Esta campaña experimental, se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona EPSEB.

#### **III.8.4 Comparativa entre las probetas reforzadas con fieltro de fibra vegetal y las reforzadas con fibras sintéticas de polipropileno.**

En el desarrollo de este trabajo tocaremos específicamente dos tipos; una natural; de origen vegetal; que es el fieltro de lino y a modo comparativo una artificial; sintética que es la de polipropileno a sabienda de que este tipo de fibra es poco sustentable y tiene un costo elevado.

1. La fibra de polipropileno, de acuerdo a lo observado en el trabajo anterior de fin de master[146], para su correcta dispersión y formar una mezcla homogénea, luego de ser pesada se procede a verter el agua en el recipiente donde se prepara la mezcla.
2. Se le agrega la cantidad determinada de las fibras y se procede al agitado de estas hasta estar dispersas y con una

aparición de que han absorbido el agua.

3. Posterior a esto se sigue el mismo proceso de fabricación de las placas descrito en el apartado III.7.2.

#### **III.8.5 Ensayo de condiciones reales.**

Para el ensayo de las condiciones reales, hemos colocado un total de 5 placas con las dosificaciones que van desde 10%Mk hasta el 50 %Mk.

Estas muestras fueron colocadas en la entrada principal de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona ESAB el día 17 de abril del año 2017. Este tema de estudio se amplía mas adelante.

CAPÍTULO 4

Resultados

## IV. RESULTADOS

Los resultados de la campaña experimental se dividen en cinco partes; la primera parte (apartado IV.1.1) arroja los resultados obtenidos en el estudio de la matriz, ordenados de acuerdo al desarrollo experimental de cada ensayo, que va desde las medidas del pH de las composiciones estudiadas, un análisis del tiempo de fraguado, hasta las resistencias mecánicas de las composiciones estudiadas.

La segunda parte (apartado IV.1.2) analiza los resultados obtenidos en las pruebas sobre el comportamiento de la fibra sin ser sometidas a ningún agente (entiéndase en su estado natural) como sometidas a matrices a base de materiales alcalinos.

La tercera parte (apartado IV.1.3) nos muestran los resultados mecánicos obtenidos del material compuesto; es decir como se comportan actuando juntos.

La cuarta parte (apartado IV.1.4) nos muestra los resultados obtenidos de las pruebas requeridas para una posible aplicación; pavimentos.

La quinta parte contiene análisis comparativos del comportamiento mecánico de un compuesto con fibras vegetales frente a otro elaborado con fibras sintéticas.

Finalmente, se realiza una puesta en obra de las piezas en la posible aplicación antes mencionada.

### IV.1.1 Estudio de la matriz

#### IV.1.1.1 Medidas del PH

Los resultados obtenidos en este ensayo, nos muestran en la Figura IV-1 una comparativa entre las composiciones estudiadas y el Cemento Portland convencional.

Los resultados de pH indican que la reducción de la alcalinidad es menor en todas las composiciones que contienen Mk, en comparación que en las que contienen 100% de cemento, ya sean en las de CP como en la de CAC.

A medida que vamos añadiendo a las composiciones mas contenido de Mk, mas bajo es el pH, básicamente porque tenemos menos contenido de cemento.

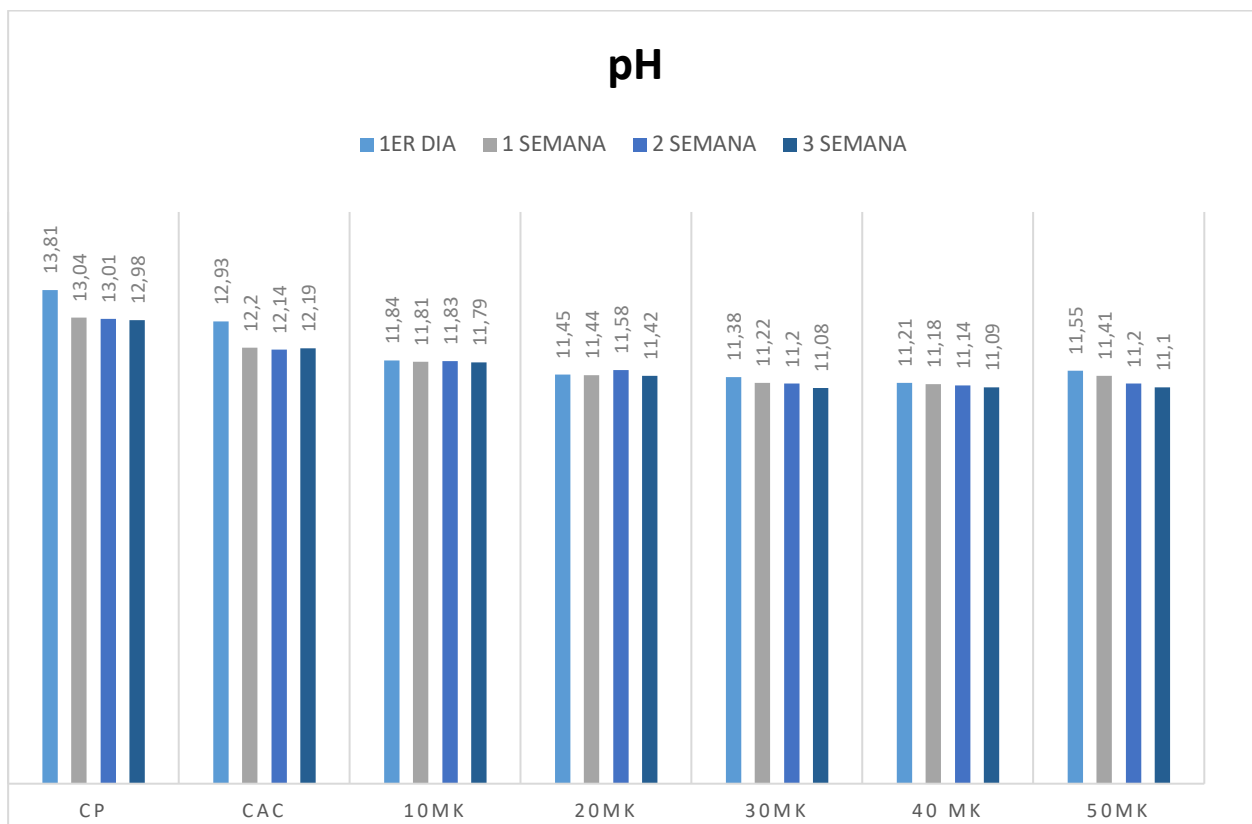


Figura IV-1 Resultados obtenidos en la prueba pH. Fuente: Elaboración propia.

Podemos decir que a medida que va transcurriendo el tiempo, los pH van decreciendo debido a los productos estables que se van generando y se van formando productos no alcalinos.

En el caso de la composición con un 10 %Mk, no se muestra una pérdida significativa de dureza en comparación con las demás, donde las partículas de Mk son más blandas.

#### **IV.1.1.2 Microdureza Vickers.**

Debido a que la reacción entre el Mk y el CAC es muy baja (comprobado en el estudio de microscopía electrónica), el Mk actúa comportándose como un árido, por lo que en esta prueba vemos que a medida que aumenta el contenido de Mk en las probetas pierde dureza.



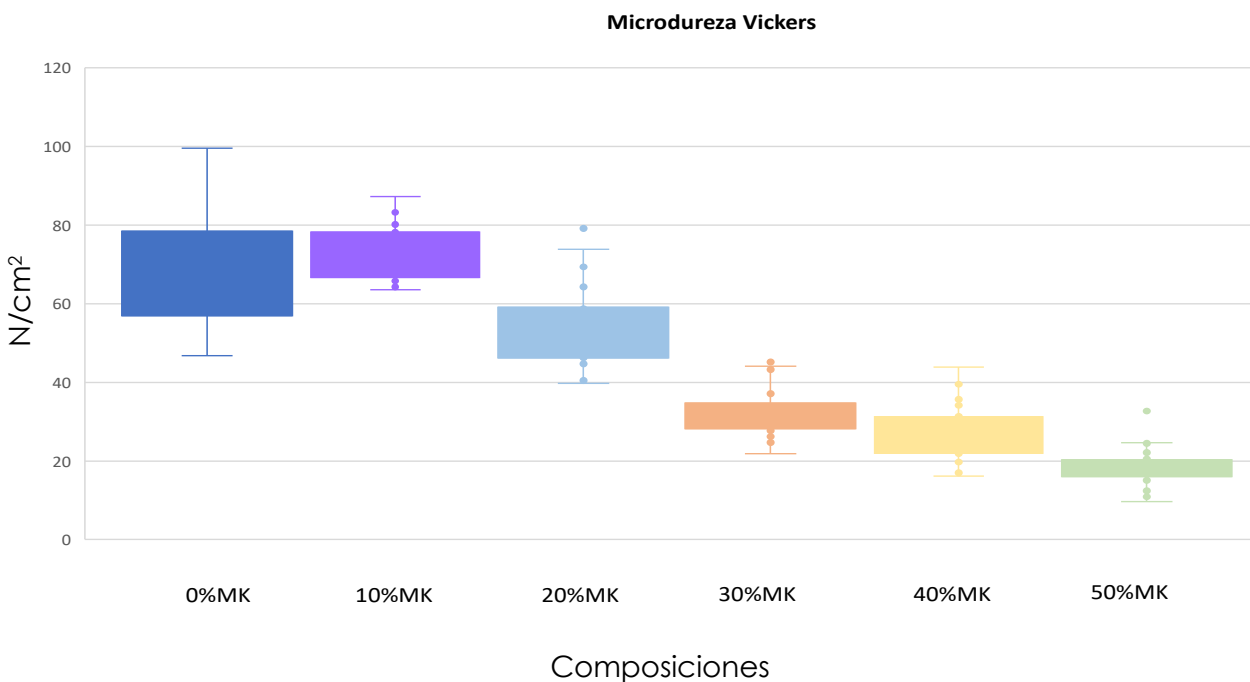


Figura IV-2 Microdureza Vickers. Fuente: Elaboración propia.

#### **IV.1.1.3 Determinación del tiempo de fraguado por el método vicat.**

Estos resultados nos permitimos exponerlos juntos, debido a que Según la norma UNE 196-1:2005 la consistencia normal es un ensayo obligatorio para el desarrollo de las medidas del tiempo de fraguado; es decir, los datos obtenidos con la consistencia normal no se procesaron, simplemente eran tomados en cuenta y anotados para la preparación de las muestras, así como los datos obtenidos con el DSC, simplemente eran observados para el desarrollo del ensayo medidas del

tiempo de fraguado, y saber el comportamiento que tendría la mezcla.

Esta Tabla IV-1 muestra los datos más relevante obtenidos de los ensayos de laboratorio. Podemos observar en estos resultados que no existe una relación directa entre el aumento del metacaolín con los tiempos inicial y final de fraguado, no obstante el tiempo de fraguado si muestra cierta proporcionalidad: a mayor cantidad de metacaolín menor es el tiempo de fraguado.

Todas las composiciones mostraron una resistencia máxima casi homogénea

excepto la mezcla de 40%MK la cual además muestra el tiempo de inicio de fraguado menor.

El ritmo de variación máxima es una variable que usamos para medir el tiempo durante el cual se observa el mayor

incremento de resistencia de la composición, tiempo que es medido a partir del inicio del fraguado. Transcurrido este tiempo, no hubo mucha diferencia en la resistencia hasta el final del fraguado. Esta variable nos da una aproximación más real del tiempo que tenemos para manipular el material.

En el ritmo de variación máxima resalta la composición 30%MK con 13 minutos, siendo la única con presencia de metacaolin que marco un ritmo similar a la composición de 0%MK; cabe resaltar que estas dos composiciones tuvieron un tiempo de inicio de fraguado muy similar además de ser los dos con lecturas de resistencia inicial mas baja.

Tabla IV-1 Resumen resultados del ensayo Vicat. Fuente: Elaboración propia.

Tabla comparativa de las mezclas	0%MK	0%MK	20%MK	30%MK	40%MK	50%MK
<b>Inicio de fraguado (minuto)</b>	144	203	190	147	131	227
<b>Final de fraguado (minuto)</b>	177	229	214	169	153	245
<b>Tiempo de fraguado (minutos) =</b> (Final de Fraguado – Inicio de Fraguado) + 1	34	27	25	23	23	19
<b>Resistencia inicial</b> (primera lectura al inicio del fraguado)	30,7	35,3	35,5	29	33,7	36,2
<b>Recorrido de la aguja en el fraguado final</b>	39,1	39,5	39,3	40	36,7	40
<b>Ritmo De Variación Máxima (Minutos)</b>	13	8	8	13	9	7
<b>Resistencia final variación máxima</b>	38.1	39,8	39.5	39,8	36,8	39,7

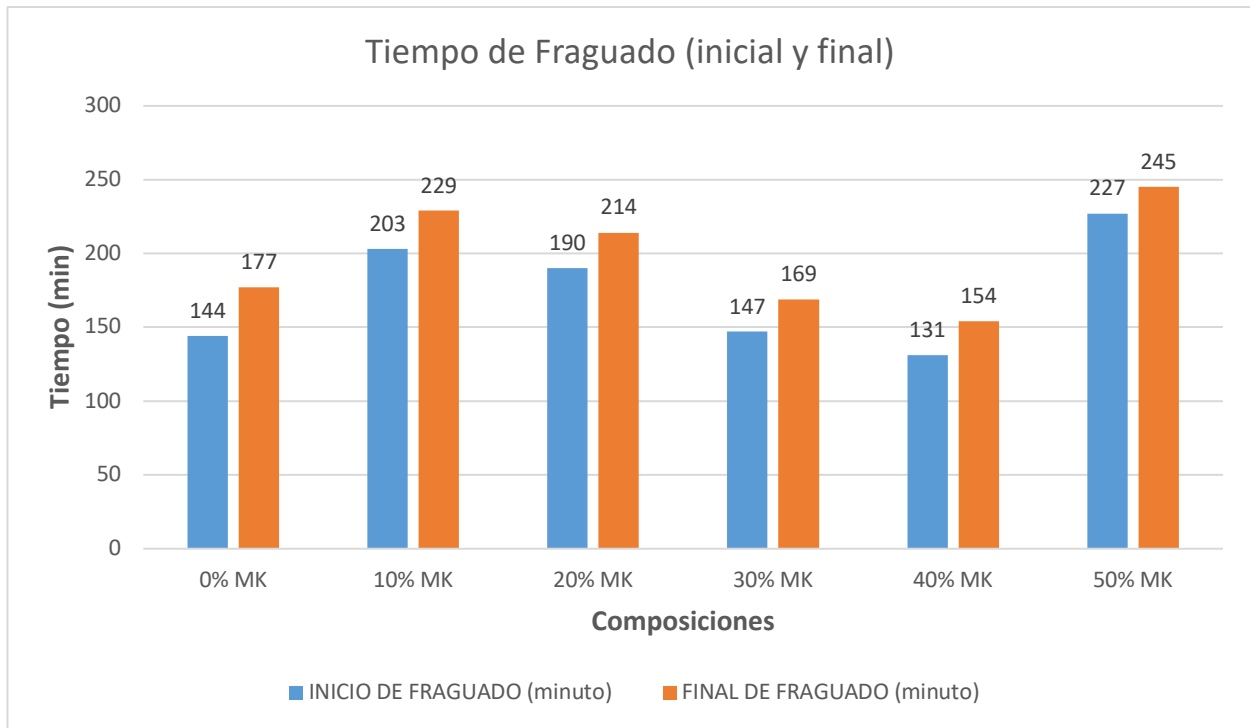


Figura IV-4 Tiempo inicial y final de fraguado del ensayo vicat. Fuente: Elaboración propia.

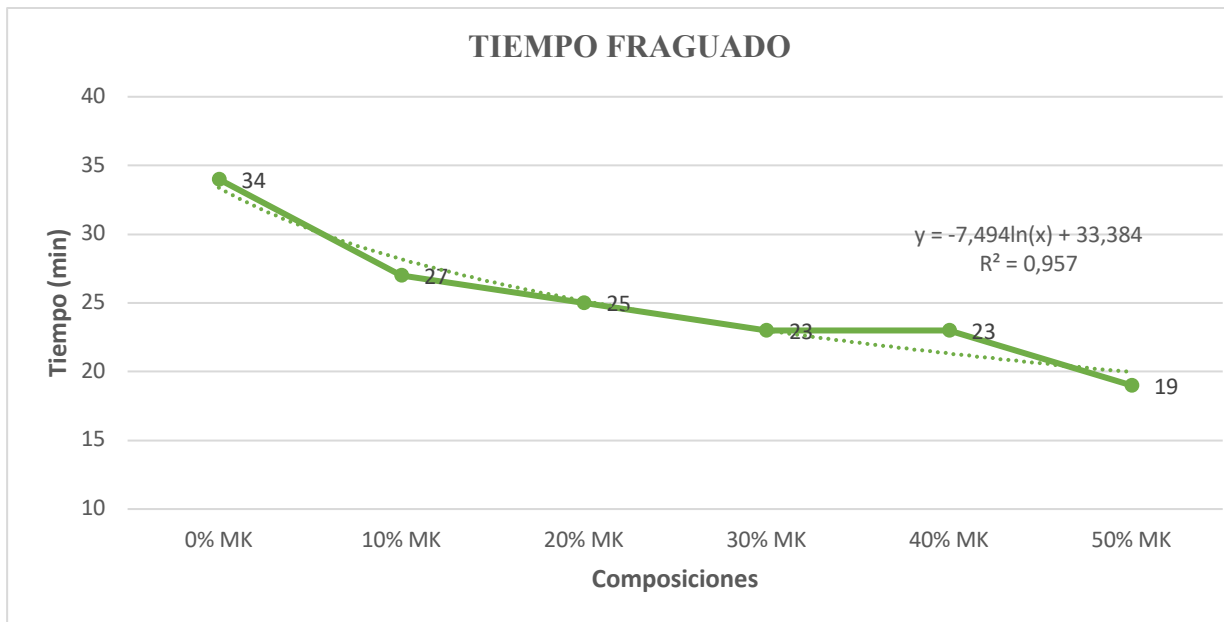


Figura IV-3 Tiempo de fraguado del ensayo vicat. Fuente: Elaboración propia.

La Figura IV-4 nos muestra los tiempos iniciales y finales de fraguado. A pesar de lo fluctuante que son estos tiempos, si existe una relación de estos con la presencia del metacaolin.

La Figura IV-3 revela una tendencia geométrica inversamente proporcional entre el metacaolin y el tiempo de fraguado.

#### IV.1.1.4 Resistencia mecánica de análisis de la matriz

Los resultados obtenidos en este ensayo nos muestran los valores promedio de MOR y MOE, determinados a partir de las curvas de flexión y compresión de las pastas curadas durante 7, 28 y 56 días, se presentan en el Figura IV-5 a,b (modo de

flexión) y la Figura IV-6 c,d (modo de compresión).

Estos gráficos revelan la evolución de la resistencia y la rigidez con el tiempo de curado y el contenido de MK. También nos muestra la agrupación de la prueba Tukey HSD (Ttg) de la matriz en modo flexión.

Con respecto a la evolución de las propiedades mecánicas con el contenido de MK, en el modo de flexión, se obtuvieron valores similares de MOR (Figura IV-5 a) y MOE (Figura IV-5 b) para composiciones de hasta un 30% de contenido de MK a 7 y 28 días.

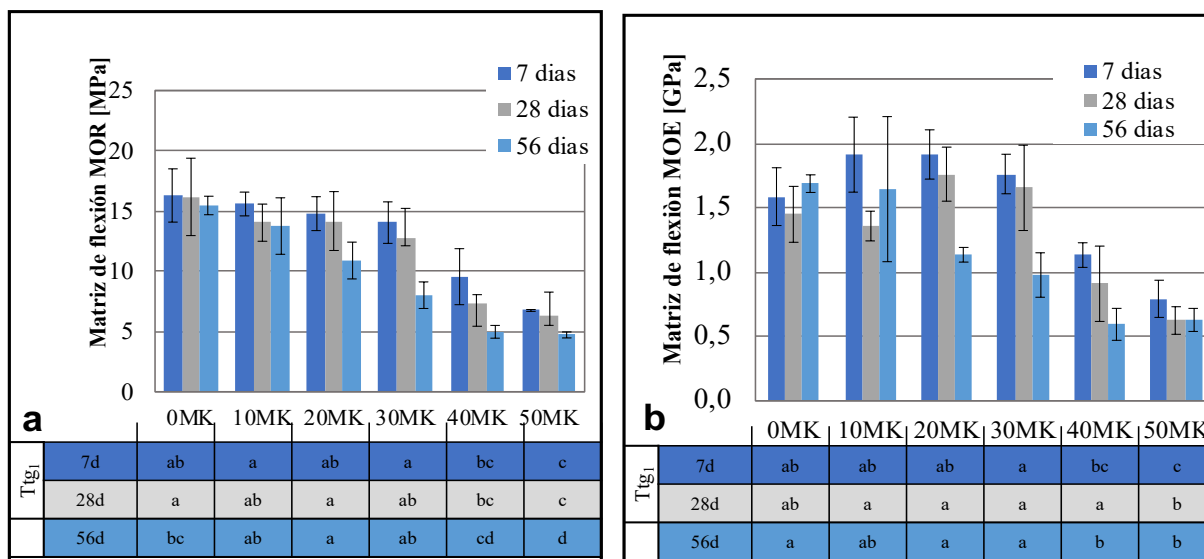


Figura IV-5 Gráficos de Resistencia mecánica a flexión 7, 28 y 56 días: a) MOR, b) MOE. Las tablas inferiores corresponden a la agrupación de categoría según Tukey.

(Figura IV-6 c) y rigidez (Figura IV-6 d) para

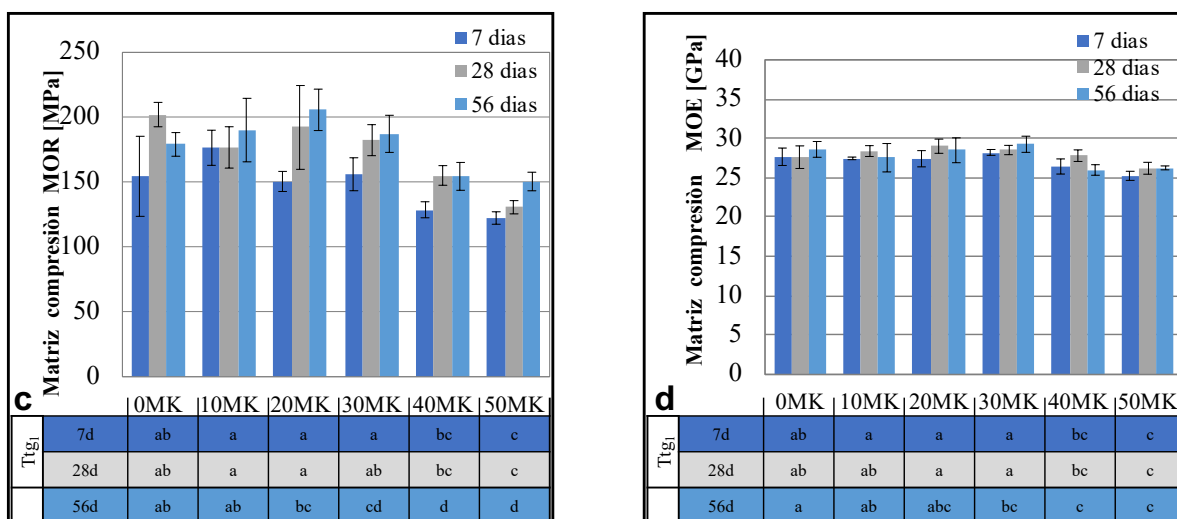


Figura IV-6 Gráficos de Resistencia mecánica a compresión 7, 28 y 56 días: c) MOR, d) MOE. Las tablas inferiores corresponden a la agrupación de categoría según Tukey.

La prueba de Tukey no reveló diferencias significativas entre estos valores. Para mayores contenidos de MK se observó una disminución de MOR y MOE, pero debido a la disminución progresiva de las medias, los grupos de la prueba de Tukey se superpusieron en el rango de 30-50MK. Además de esto, los valores de MOR y MOE después de 56 días disminuyeron claramente con el contenido de MK, donde el análisis estadístico mostró una superposición de grupos a partir de la muestra de 10MK, y no hubo diferencias significativas entre las muestras de 40MK y 50MK.

Bajo el modo de compresión, se obtuvieron los valores de resistencia

todos los tiempos de curado y contenido de MK. Aunque se logran valores ligeramente más altos para la muestra de 20MK, la separación de los grupos reveló diferencias no significativas dentro del conjunto de 0MK a 30MK.

Las variaciones progresivas condujeron a la superposición de los diferentes grupos de la prueba de Tukey, lo que obstaculizó las diferencias. Por lo tanto, por ejemplo, para los resultados MOR de 28 días, las medias no son significativamente diferentes entre 30MK y 40MK, ni entre 40MK y 50MK, pero sí son significativamente diferentes entre 30MK y 50MK. El contenido de MK reveló solo una ligera influencia en los valores de MOE

para los mayores contenidos de MK (Figura IV-6 d). Después de 28 días de curado, las muestras no mostraron diferencias (0–40MK) excepto las 50MK.

Con respecto a la evolución del rendimiento mecánico con el tiempo de curado, en el modo de flexión, la resistencia disminuye con el tiempo de curado, independientemente del contenido de MK. Bajo el modo de compresión, se observó una tendencia opuesta general con un aumento de la resistencia con el tiempo de curado.

A partir de los resultados, el comportamiento observado para el efecto del contenido MK y el tiempo de curado puede atribuirse a tres fenómenos superpuestos:

1. Una reducción de la fuerza con el contenido de MK debido a un menor contenido de CAC, esto apunta a que MK actúa como un relleno en lugar de un aditivo puzolánico en las matrices estudiadas, como se discutirá más adelante.
2. La conversión de las fases hidratadas CAC con el tiempo de curado como es bien sabido, típicamente, la conversión de las fases CAC

metaestables de  $CAH_{10}$  y  $C_2AH_8$  en  $C_3AH_6 + AH_3$  provoca un aumento en la porosidad y, por lo tanto, una pérdida en la resistencia mecánica[66]. Sin embargo, para la baja relación  $a/c$  utilizada en esta investigación (0.3), esta conversión no debería conducir a una reducción de compacidad excesiva, lo que significa el mantenimiento de la resistencia a la compresión [147]. Esto se debe a que, debido a la baja cantidad de agua disponible, la hidratación de la matriz está incompleta en el tiempo de curado temprano, quedando una cierta cantidad de partículas no hidratadas.

Estas partículas pueden hidratarse más tarde, precipitando en regiones porosas de la matriz, llenando así los poros [61]. Estos nuevos compuestos, a su vez, sufren los mismos fenómenos de conversión que los compuestos hidratados iniciales. En lo que a nosotros respecta, todavía no se han publicado estudios sobre la influencia de este fenómeno en el rendimiento de la flexión.

3. La capacidad potencial de nucleación de las partículas MK debido a su gran superficie específica. Aunque se deben realizar más estudios para confirmar esta afirmación, las partículas MK podrían actuar como agentes nucleantes que aceleran el proceso de hidratación en las etapas iniciales.

Por lo tanto, para muestras con un contenido de MK de hasta el 30%, el proceso de conversión que afecta a las pastas CAC se contrarrestaría con la formación y precipitación de nuevos compuestos hidratados (2) y por el posible efecto de nucleación de las partículas de MK (3), explicando el similitudes del rendimiento mecánico de las pastas a pesar del aumento del contenido de MK. Sin embargo, para mayores contenidos de MK (40% y 50%), la cantidad de aglutinante es demasiado baja, lo que lleva a una reducción general de la resistencia a la flexión y la compresión (prevaliente (1)).

Con respecto a la variación en la resistencia a la flexión y la compresión de la matriz con el tiempo de curado, independientemente del contenido de MK, se puede observar un fenómeno aparentemente contradictorio. En el

modo de flexión, el rendimiento disminuye con el tiempo, como sería lo esperado para los cementos CAC con altas relaciones  $w / c$  [148]; mientras está en modo de compresión, la resistencia se mantiene o aumenta ligeramente, como se esperaría para los cementos CAC con bajas relaciones  $w / c$  [147]. En ambos casos, el fenómeno podría atribuirse a lo que se describe en la sección (2), relacionado con la interacción entre la conversión de los compuestos hidratados y la hidratación diferida de los nuevos.

La relación entre conversión, porosidad y resistencia a la compresión ha sido ampliamente estudiada tanto para CAC[149] y Portland [150]cementos, que se encuentran directamente relacionados.

En este sentido, los mecanismos de compresión están controlados principalmente por el contacto físico entre las partículas, siendo esto mucho más fuerte para materiales más compactos. Sin embargo, hasta donde sabemos, dicha relación no se ha estudiado para la resistencia a la flexión de las pastas de cemento.

En este caso, la conversión parece presentar una mayor influencia que la

hidratación en la evolución del rendimiento de flexión de las muestras. Los mecanismos de adhesión de partículas, responsables de la resistencia a la tracción y, por lo tanto, del rendimiento de flexión, podrían estar involucrados.

La precipitación de los nuevos compuestos hidratados en los poros, desencadenada por una conversión inicial de las fases, podría estar desarrollando una adhesión no lo suficientemente fuerte como para alcanzar una buena respuesta de tracción capaz de mejorar la resistencia a la flexión.

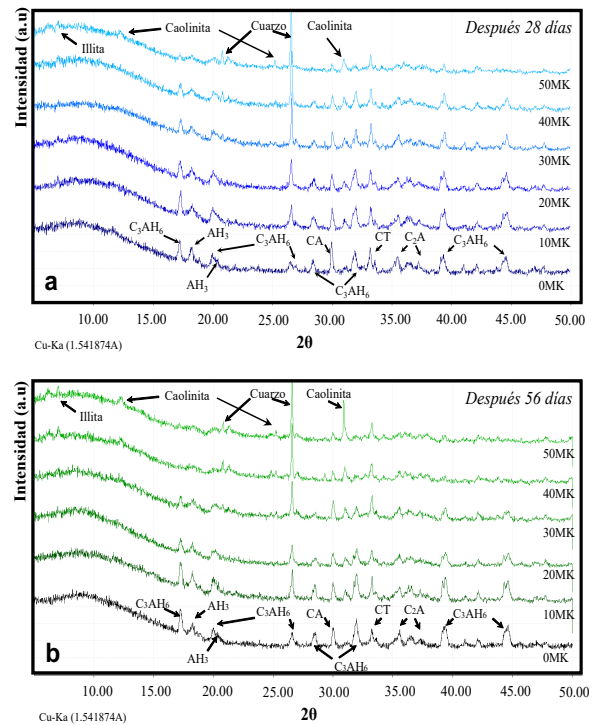


Figura IV-7 Espectros DRX para las diferentes matrices basadas en CAC con contenido entre 0-50% de metacaolín (MK) después del curado durante 28 días (a) y durante 56 días (b).

#### IV.1.1.5 Análisis químico (DRX).

Los resultados obtenidos en los ensayos de Difracción de rayos X (DRX), realizadas a las composiciones estudiadas se muestran en la Figura IV-7, los espectros para todas las matrices después de 28 y 56 días y las fases observadas. Las gráficas revelan una transición progresiva en los picos correspondientes a las fases CAC y MK, que disminuyen y aumentan (respectivamente) de acuerdo con el contenido de metacaolín en la pasta.

Con respecto a la pasta CAC pura, en el Figura IV-7a (curva MK al 0%) se puede



observar que después de 28 días de curado estaba presente una cierta cantidad de  $C_2AH_8$  metaestable, mientras que después de 56 días de curado solo se observaron fases estables (Figura IV-7 b, 0% de curva MK). Además, después de 28 días de curado, el pico correspondiente a la fase anhidra de CA apunta a la existencia de partículas que permanecieron para la hidratación, mientras que después de 56 días esta fase de CA se redujo en gran medida. Por lo tanto, en este período se experimentó una hidratación de la fase CA. Esto es consistente con lo que se señaló anteriormente, en los resultados mecánicos.

Principalmente, los espectros DRX revelaron:

- i) presencia de  $C_2AH_8$  en las muestras después de 28 días;
- ii) conversión completa de las fases  $CAH_{10}$  en  $C_3AH_6$  y  $AH_3$  en todas las muestras durante 56 días;
- iii) reducción de las fases anhidras de CAC (CA, CT y  $C_2A$ ) entre las muestras curadas durante 28 días (Figura IV-7a) y las curadas durante 56 días (Figura IV-7b). Todo esto explica la conversión de fase y la evolución de hidratación de las pastas CAC estudiadas.

**IV.1.1.6 MICROESTRUCTURA**

Los resultados obtenidos en este estudio BSEM, nos confirma lo visto en el DRX, ningunas de las imágenes nos revela picos fuertes que significan la formación de nuevos compuestos o fases.

En las Figura IV-8Figura IV-9 se presentan las micrográficas BSE-SEM de las matrices 0MK y 50MK (respectivamente) después de 28 días de curado. La composición de las diferentes zonas fue determinada por EDS.

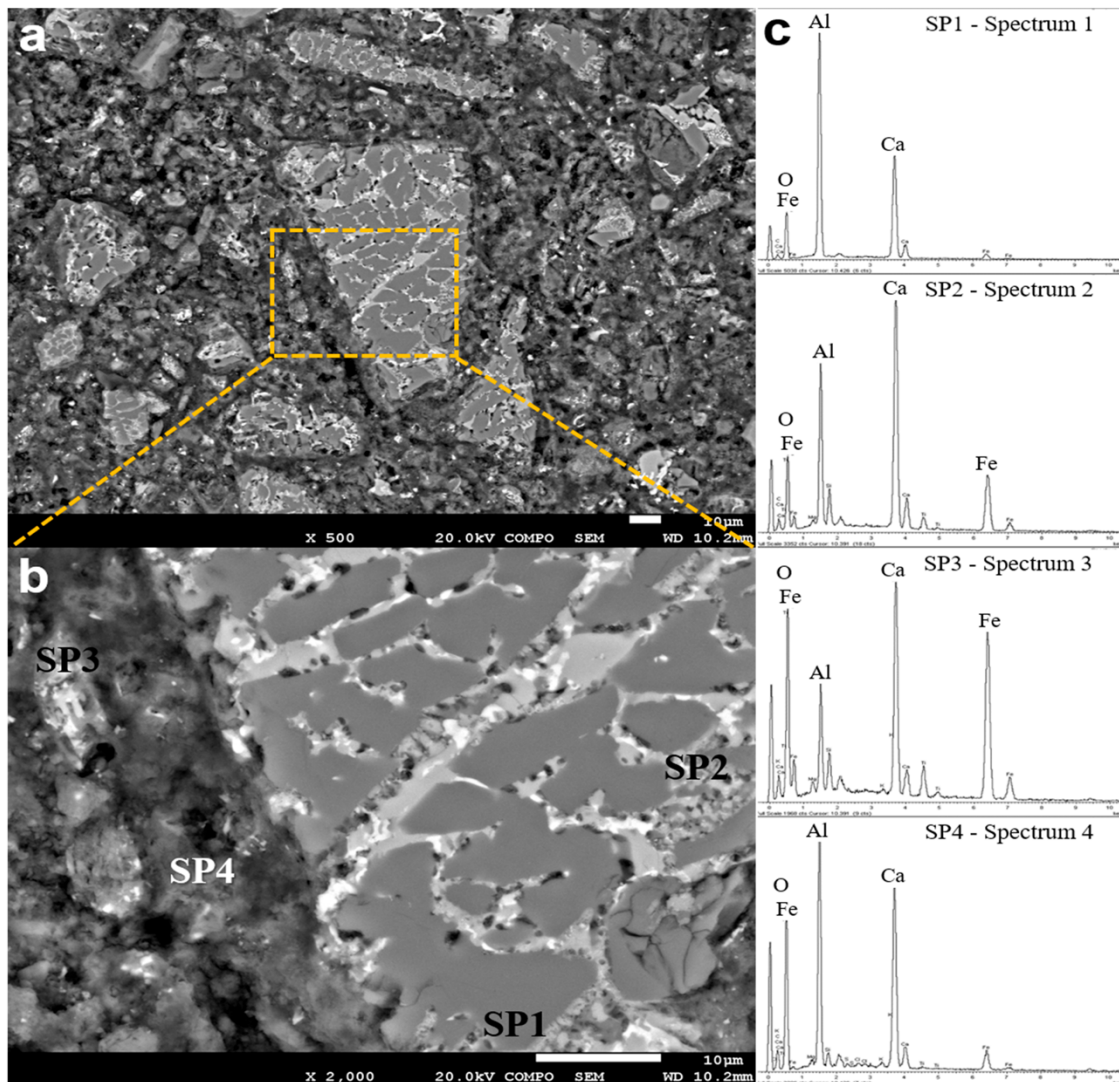


Figura IV-8 (a) Micrografía BSE-SEM de la pasta 0MK después de 28 días que muestra partículas polifásicas anhidras y zonas hidratadas de C3AH6 + AH3 (b) Micrografía BSE-SEM que muestra las áreas para el análisis EDS y (c) espectros EDS correspondientes a SP1 = fase anhidra; SP2 y SP3 = fases anhidras con alto contenido de hierro Ferro-CT; y SP4 = AFm FASE HIDRATADA. Fuente: Elaboración propia.

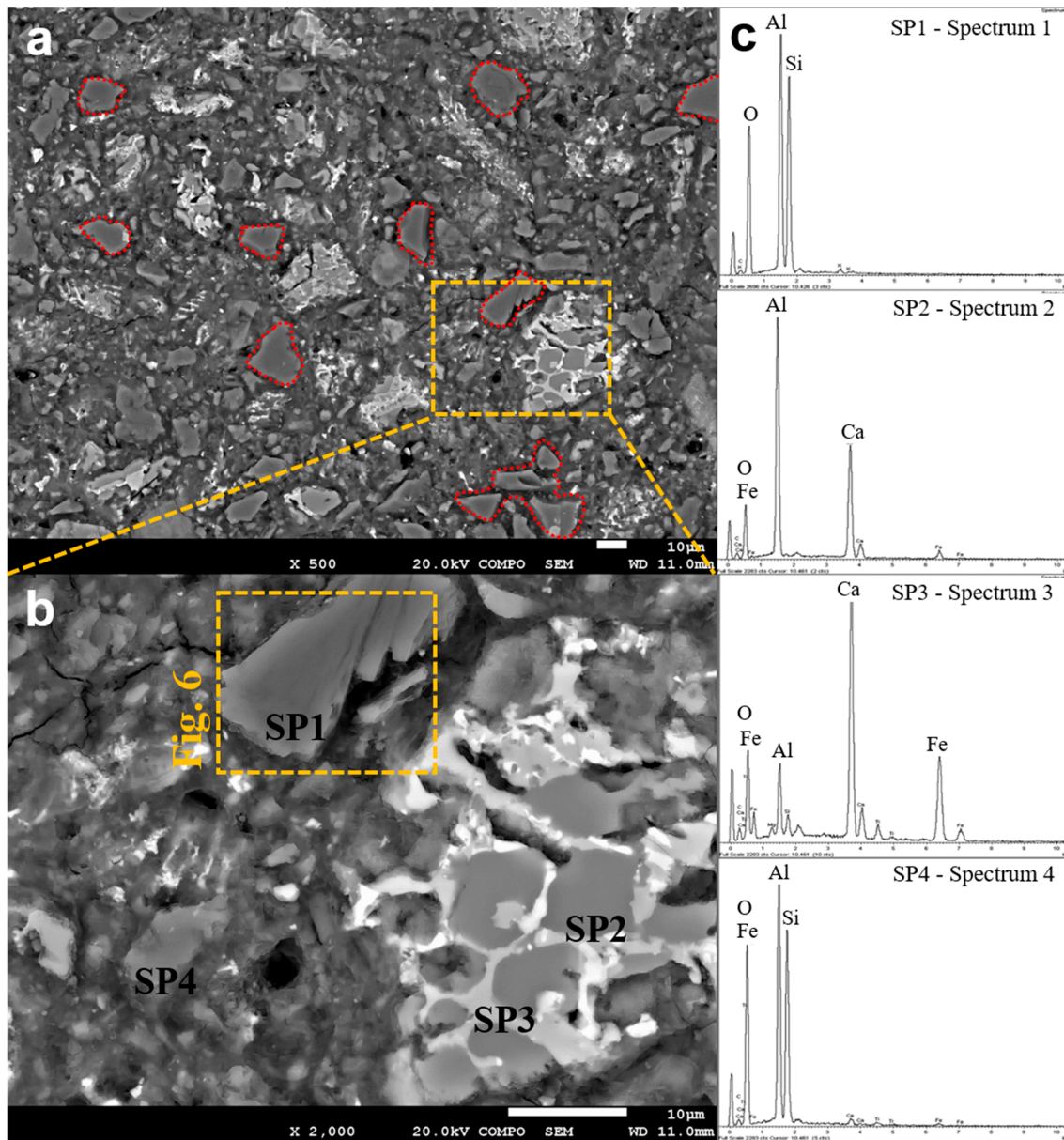


Figura IV-9 (a) Micrografía BSE-SEM de la pasta 50MK después de 28 días que muestra partículas polifásicas anhidras, partículas de metacaolín sin reaccionar (marcadas con flechas rojas) y zonas hidratadas de C3AH6 + AH3. (b) Micrografía BSE-SEM que muestra las áreas para el análisis EDS y el área para una micrografía detallada presentada en la Figura (marcada en amarillo). (c) Espectros de EDS correspondientes a: SP1 y SP4 = metacaolín; SP2 = CA fase anhidra; y SP3 = Ferro-CT de fases anhidras con alto contenido de Fe Ferro.CT. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura IV-8 la pasta de CAC puro (0MK) después de 28 días mostró la presencia de partículas polifásicas anhidras y zonas hidratadas, como se esperaba. De acuerdo con el análisis de EDS (Figura IV-8 c y d), se detectaron las fases comunes encontradas en los cementos CAC. De lo contrario, la muestra de 50MK en la Figura IV-9 b presentó múltiples partículas de MK sin reaccionar, aparte de las fases propias del cemento CAC, como se puede ver en la Figura IV-10.

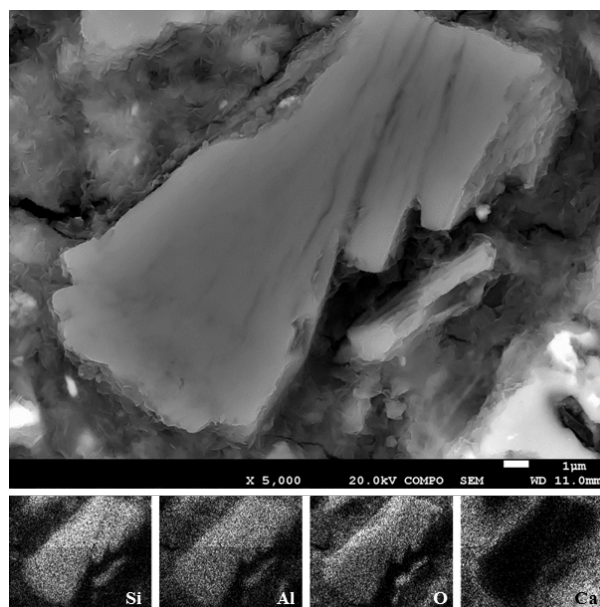


Figura IV-10 BSE-SEM que muestra un detalle de la partícula de Metacaolín en la Figura e imágenes de mapeo EDS de los elementos de la composición principal (Si, Al y O) en ausencia de calcio (Ca). Fuente: Elaboración propia.

## IV.1.2 Durabilidad de las fibras en el CAC.

### IV.1.2.1 Ensayo mecánico de las fibras de fieltro de lino.

En esta parte analizaremos los resultados obtenidos tanto en el comportamiento que tuvo la fibra al estar en contacto con la pasta de matriz así como el resultado obtenido al ser sometida al análisis en el texturómetro.

Los efectos de la pasta de cemento en la durabilidad del refuerzo de fibra vegetal se evaluaron mediante ensayos de tracción realizados en las telas no tejidas después de la inmersión en las pastas y se sometieron a 5 o 10 ciclos húmedo / seco. Los resultados de la carga máxima (normalizada por el peso) se presentan en la Figura IV-11.

A pesar de la alta desviación estándar de los resultados, debido a la alta variabilidad intrínseca en las propiedades del refuerzo de tela no tejida, se puede observar una clara tendencia con respecto a dos fenómenos superpuestos.

Por un lado, se observan los valores de resistencia más bajos después de 5 o 10 ciclos de envejecimiento para las muestras con contenido de 0MK. Al aumentar el contenido de MK, la

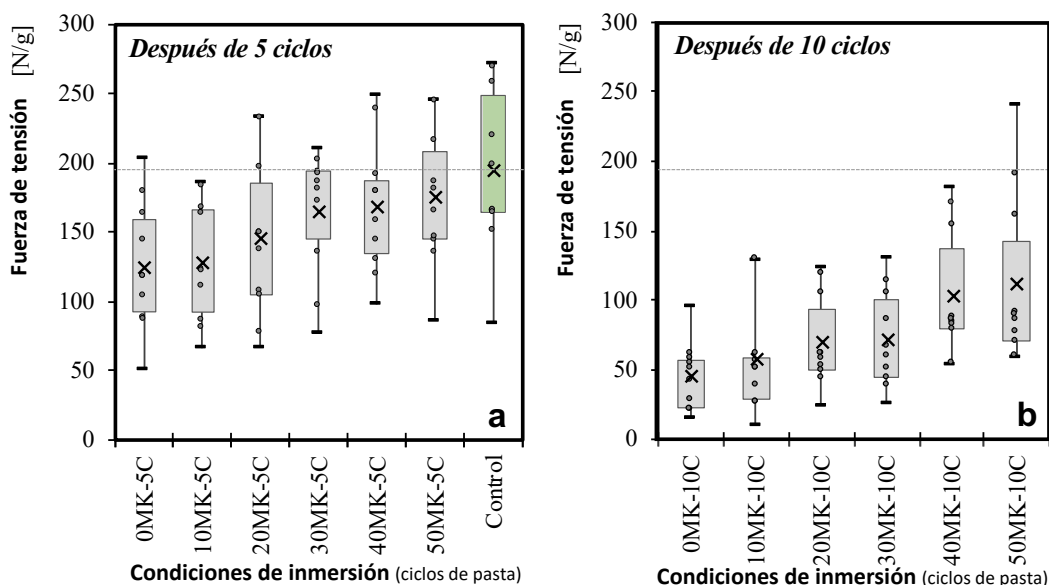


Figura IV-11 Diagrama de caja para la resistencia de los fieltro después de 5 (a) y 10 (b) ciclos de inmersión en las diferentes pastas de cemento. Las cajas contienen los valores extremos del 50% de las muestras. Los puntos marcados como x corresponden a los valores medios. La línea punteada indica el valor promedio de la muestra de control.

resistencia del refuerzo se acercó a la muestra de control, que no estaba en contacto con la pasta.

Dado que MK está actuando solo como relleno, como lo confirman los resultados mecánicos y DRX discutidos anteriormente, el menor daño producido en las telas en la pasta de cemento con mayor contenido de MK podría deberse a un menor contenido de pasta de cemento para degradar las fibras.

Por otro lado, como se esperaba, los valores de resistencia máxima de los tejidos disminuyen con el envejecimiento.

#### IV.1.2.2 Análisis de las fibras mediante microscopía electrónica.

Para evaluar los cambios en las fibras, se realizó una imagen SEM de las fibras. Como se muestra, las fibras limpias presentan una superficie lisa con los nodos característicos de las fibras de lino (Figura IV-12 con fines comparativos, las fibras de los tejidos sometidos a 5 ciclos húmedo / seco en cemento Portland (condiciones CP-5C) se muestran en la Figura IV-13.

En esta imagen es posible ver algunos daños en la fibra superficial atribuidos al efecto de los compuestos alcalinos de la pasta de cemento [151], y una gran cantidad de compuestos hidratados (Figura IV-13).

El daño de la fibra implica una gran rugosidad de la superficie y grietas transversales que reducen la resistencia a la tracción de la fibra. Los fieltros sometidos a ciclos húmedo / seco en pastas con un contenido de MK de hasta el 30% (Figura IV-14) no presentaron tal daño, y solo se observaron algunas grietas longitudinales en la superficie de las fibras que afectaban las capas externas de la fibra, lo que condujo a la fibrilación de fibra (ejemplo en la Figura IV-14 d).

Los ciclos húmedo / seco en pastas de 40MK y 50MK produjeron daños menores, aunque la rugosidad de la superficie (Figura IV-18 h) y las trazas de grietas longitudinales (Figura IV-17).

Estos resultados muestran que la matriz CAC es menos agresiva con las fibras naturales en comparación con Portland. Además, una parte del tipo de cemento, también la adición de MK a la mezcla CAC ayuda a reducir aún más el

daño de la fibra. Esto podría estar relacionado con la ausencia de pastas CAC de formación de Portlandita, además de la reducción del contenido de cemento debido a la adición de MK.

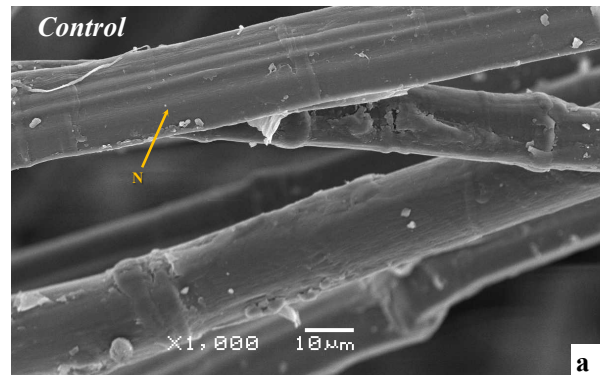


Figura IV-12 Micrografías control fibra fieltro.

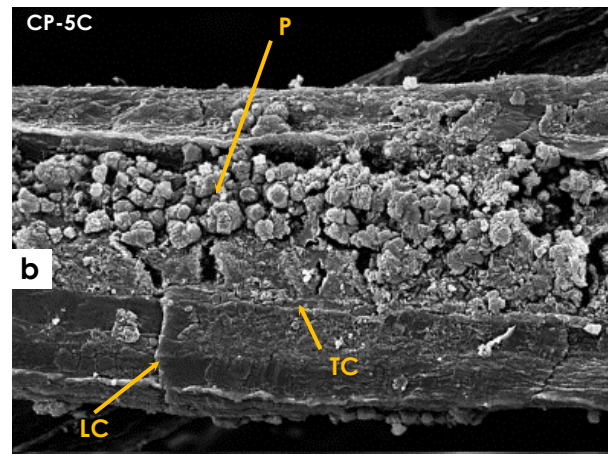
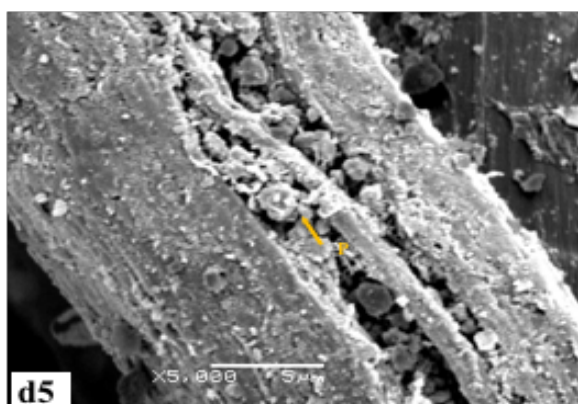
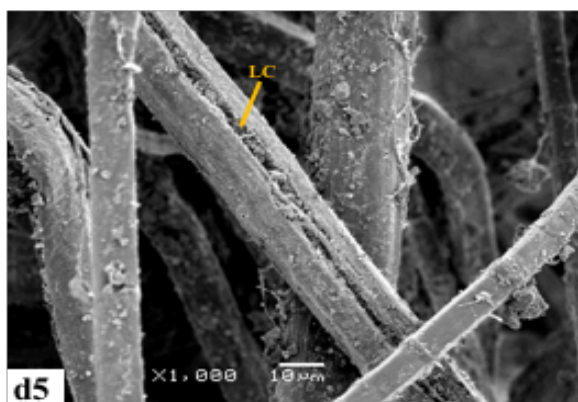
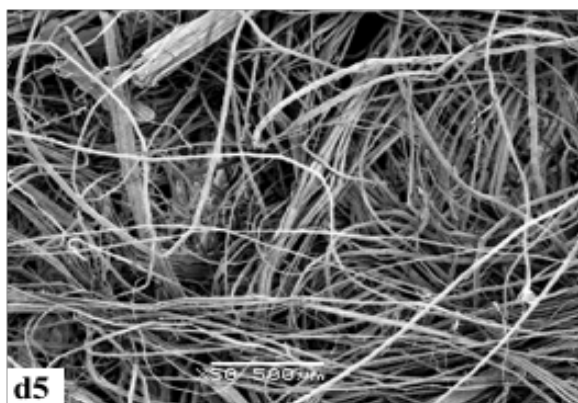


Figura IV-13 Micrografía CP 5 ciclos

**5 Ciclos 10MK-5C**



**10 Ciclos 10MK-10C**

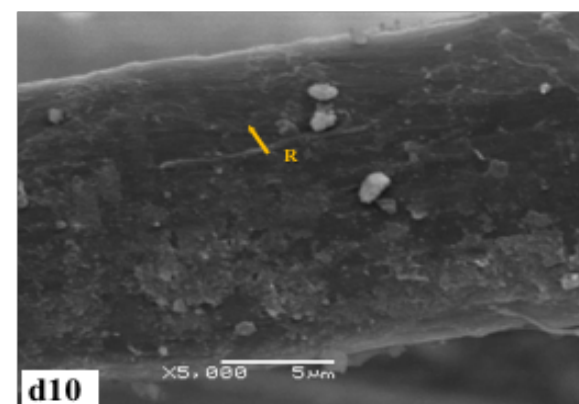
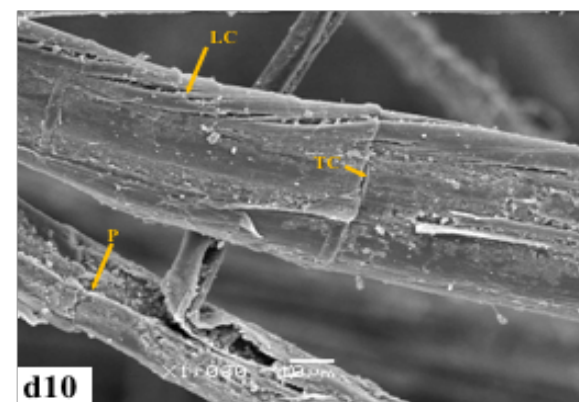
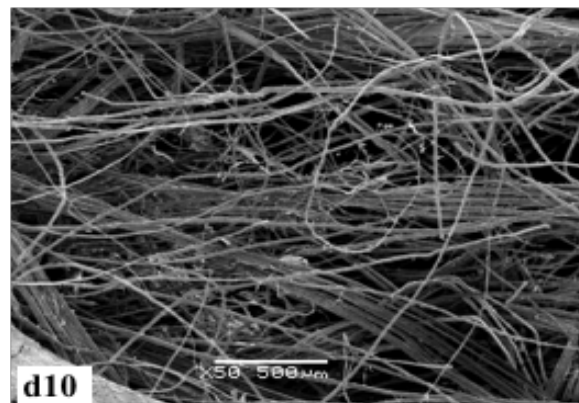


Figura IV-14 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (d5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (10%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (d10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (10%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie.

**5 Ciclos 20MK-5C**



**10 Ciclos 20MK-10C**

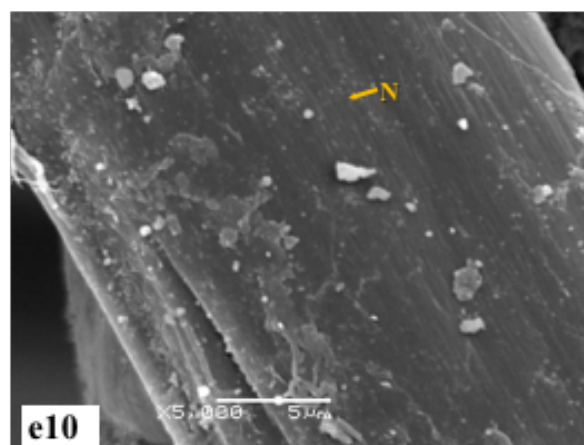
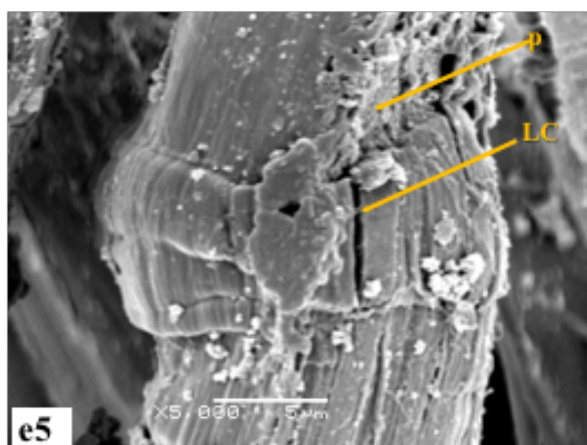
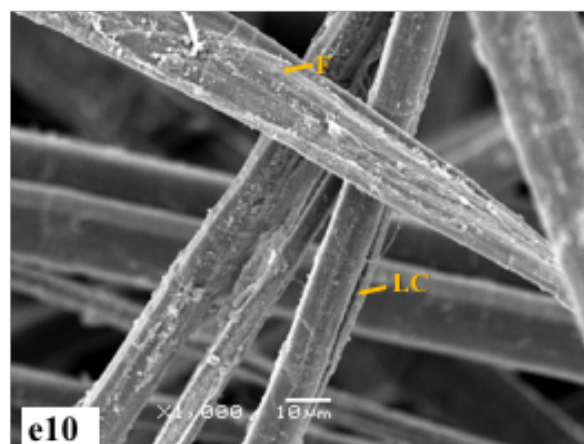
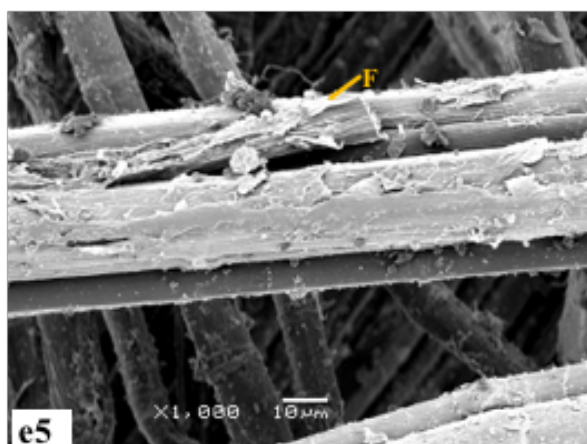
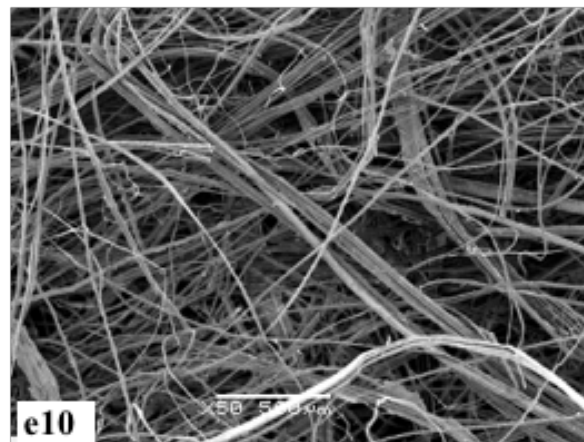
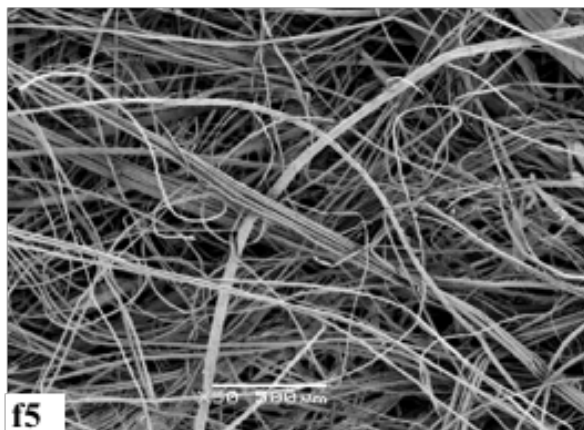


Figura IV-15 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (e5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (20%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (e10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (20%MK) después de 10 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie.



**5 Ciclos 30MK-5C**



**10 Ciclos 30MK-10C**

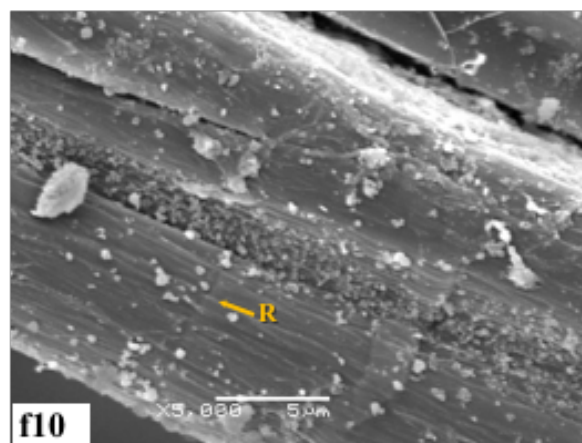
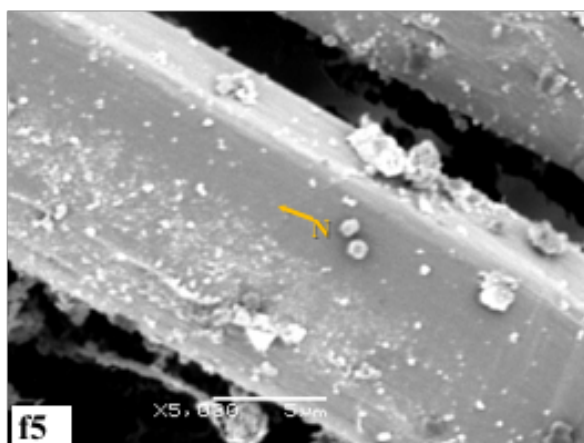
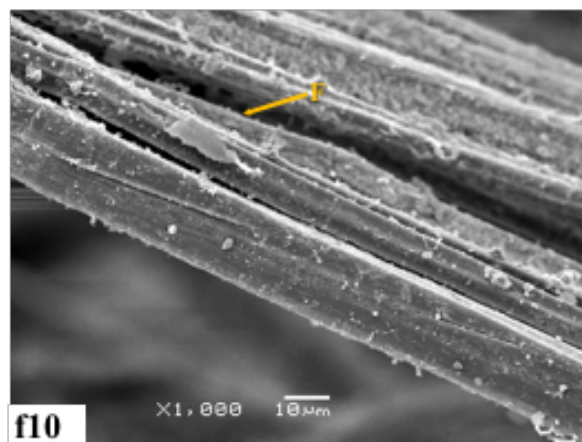
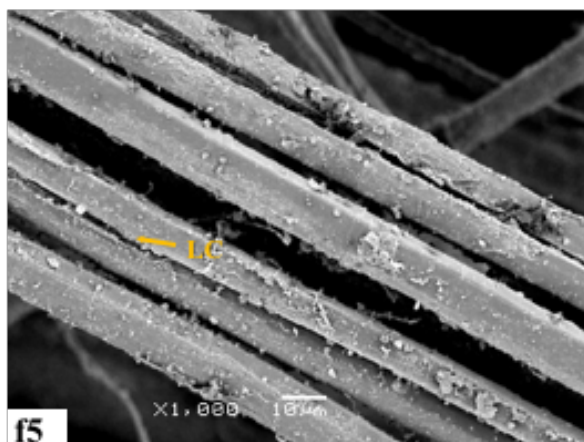
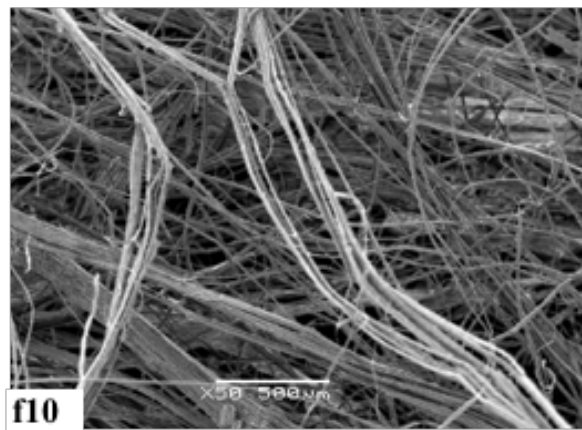
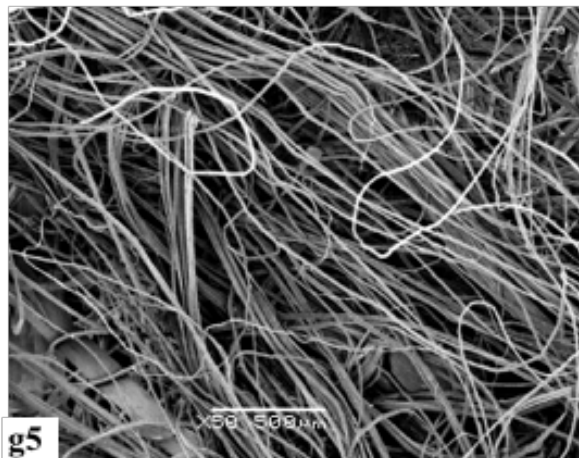


Figura IV-16 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (f5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (30%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (f10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (30%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nudo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie.

**5 Ciclos 40MK-5C**



**10 Ciclos 40MK-10C**

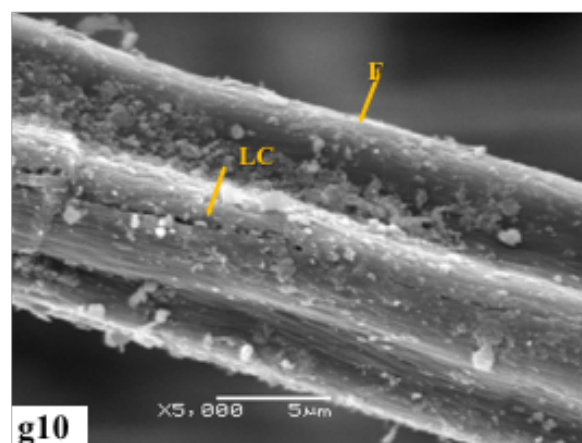
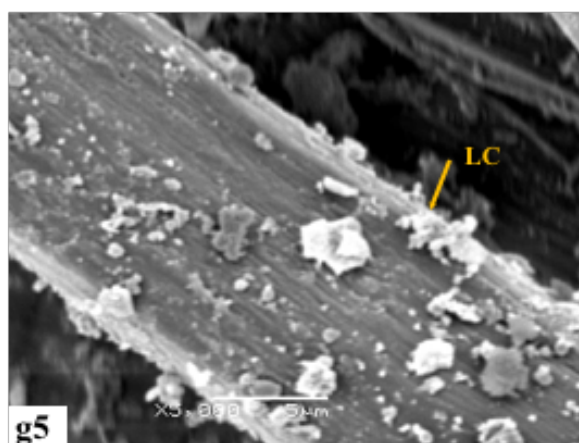
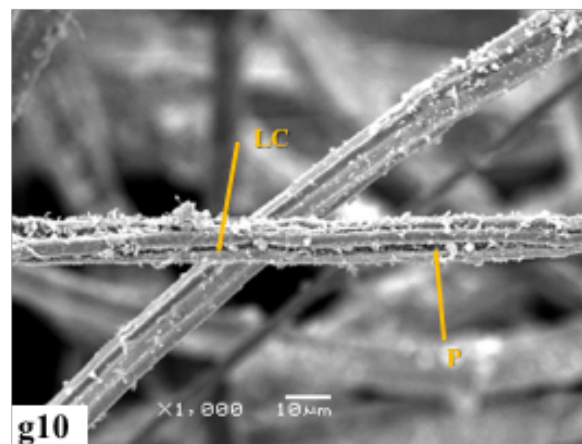
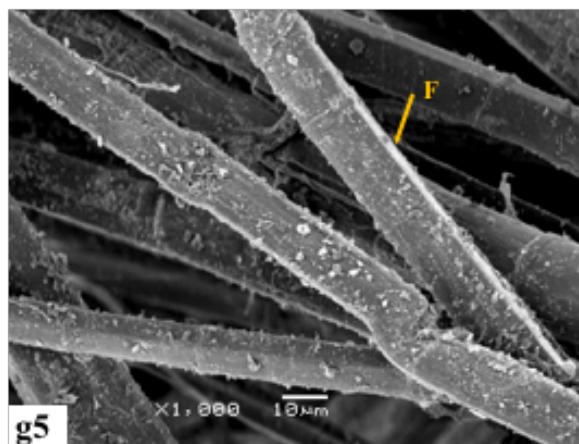
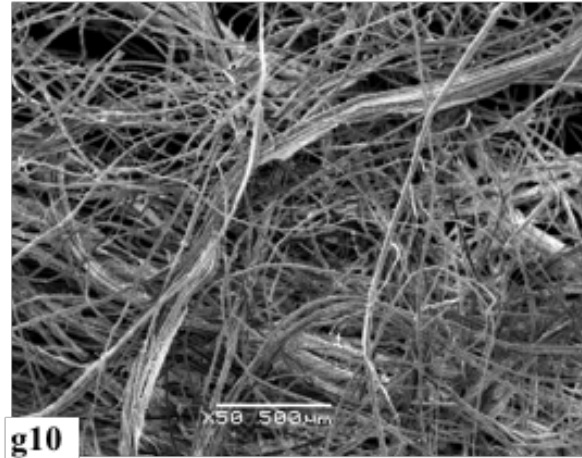


Figura IV-17 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (g5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (40%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (g10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (40%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. **Nota :** (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie.

**5 Ciclos 50MK-5C**

**10 Ciclos 50MK-10C**

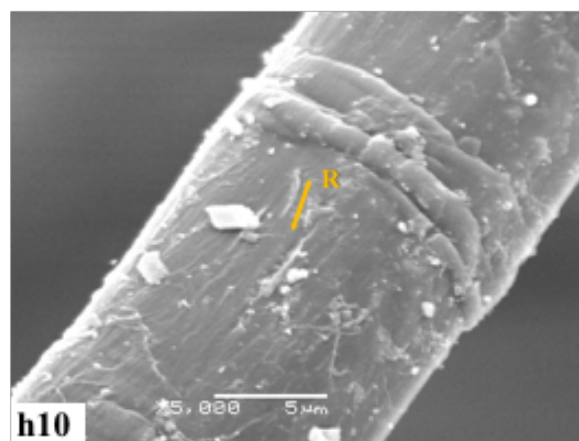
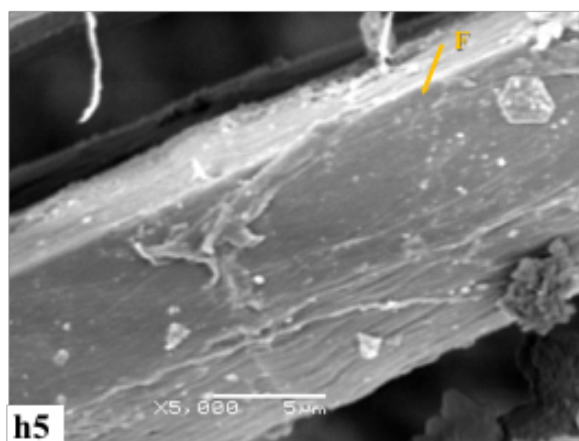
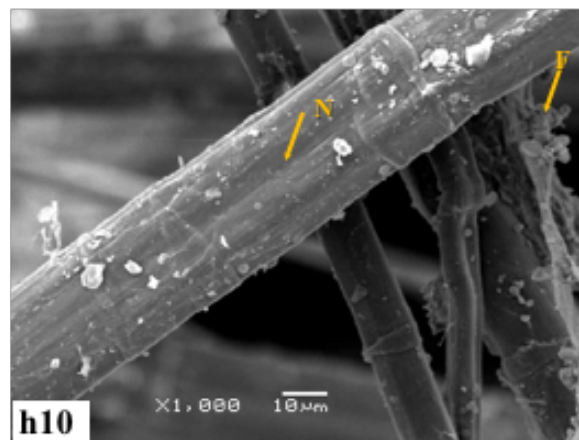
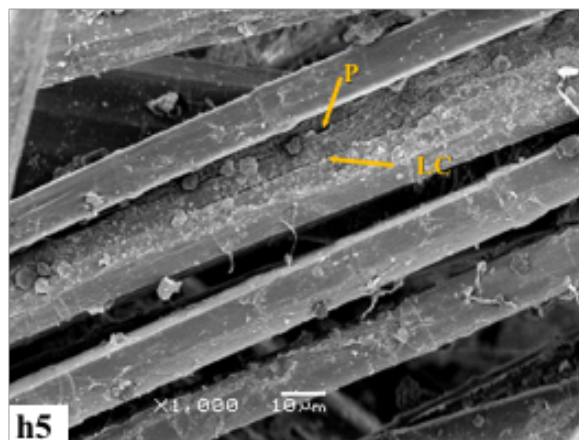
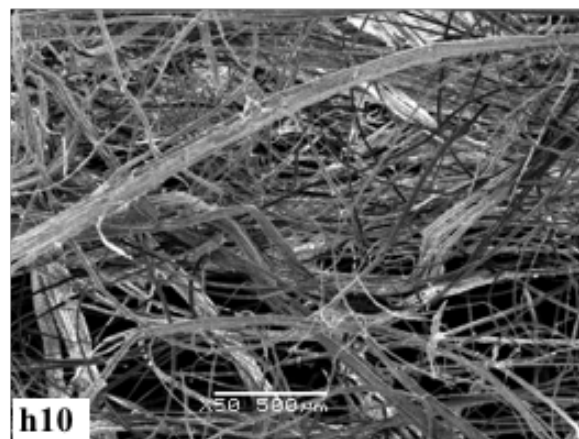
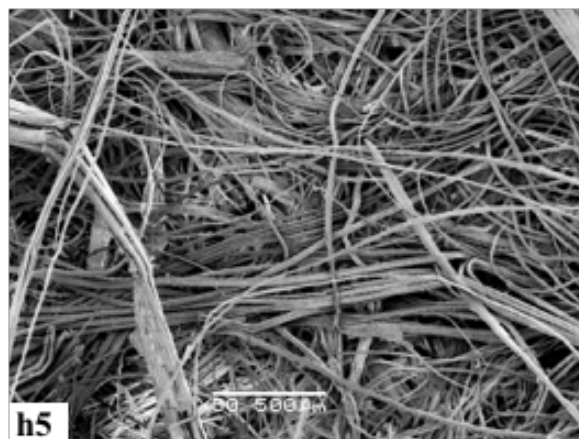


Figura IV-18 SEM de las fibras de lino de 5 y 10 ciclos de inmersión en la pasta de cemento CAC: (h5) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (50%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (5C). (h10) Fibras sumergidas en pasta CAC con 10 % contenidos de metacaolín (50%MK) después de 5 ciclos húmedo / seco (10C). El aumento en el contenido de MK mitiga el daño en la superficie de las fibras. Nota : (N) Nodo de la fibra de lino. (P) Compuestos OPC hidratados. (TC) Grieta transversal. (LC) Grieta longitudinal. (F) Fibrilación superficial. (R) Rugosidad de la superficie.

**IV.1.3 Propiedades mecánicas y durabilidad de las placas.**

**IV.1.3.1 Determinación comportamiento mecánico y envejecimiento acelerado.**

Para evaluar el rendimiento mecánico y la durabilidad de los compuestos, los laminados preparados con un contenido fijo de refuerzo y matriz CAC que variaba el contenido de MK se caracterizaron mediante pruebas de flexión *después del curado* (curado de 28 días) y *después del envejecimiento acelerado* (28 días, curado más 250 ciclos de envejecimiento). Las curvas representativas de tensión-deflexión obtenidas de las pruebas de flexión se presentan en la figura IV-19.

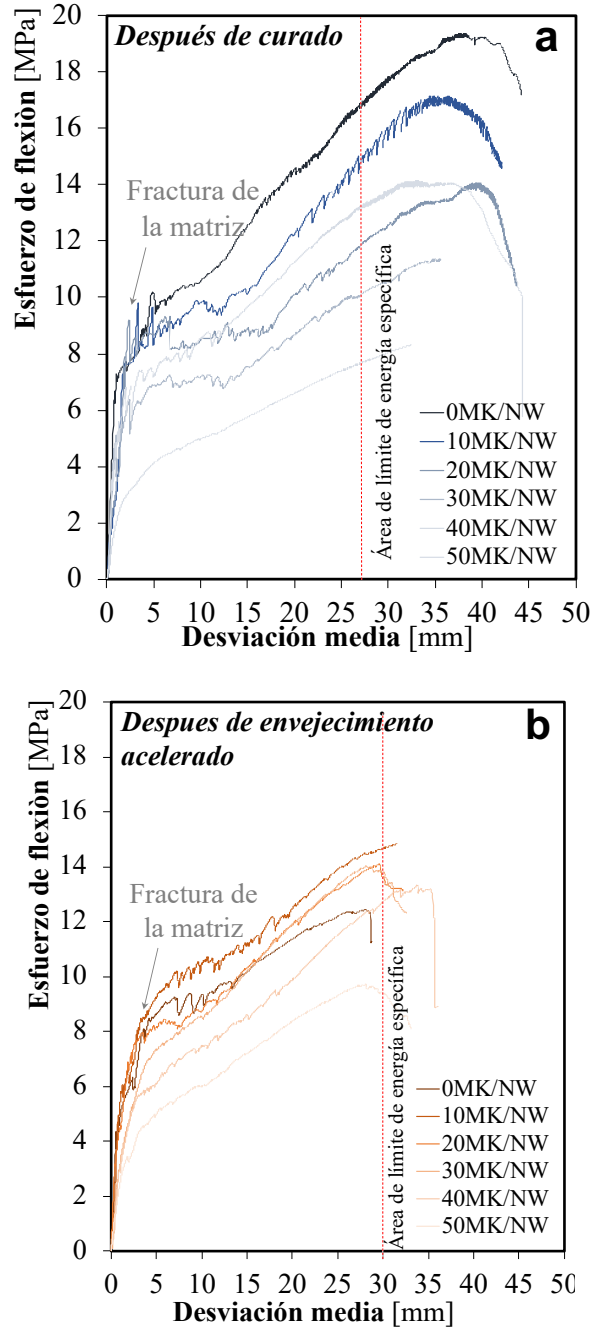


figura IV-19 Comportamiento de flexión de las muestras después de curar durante 28 días (a), y después de un envejecimiento acelerado adicional (b).

Como se puede observar, todos los materiales presentaron un comportamiento de endurecimiento por deformación (SHCC) con una capacidad muy alta de deformación debido a la formación de grietas múltiples, como se informó en estudios anteriores con este refuerzo[94] , [152].

No obstante, el comportamiento observado en los compuestos después del curado fue similar al comportamiento observado para los compuestos envejecidos, especialmente en aquellos que contienen MK. Estos resultados demuestran la durabilidad del material desarrollado con matriz basada en CAC, lo cual es una mejora significativa con respecto a los compuestos cementosos previamente reportados reforzados con telas de fibra natural [142].

Además, se observa una pendiente más pronunciada después del fallo de la matriz en los compuestos envejecidos que en los compuestos no envejecidos (figura IV 19). Esto podría estar asociado a un proceso de hornificación de fibra derivado del proceso de envejecimiento [131] [153], [154], ya que realiza ciclos de mojado / seco a los compuestos y, por lo tanto, también a las fibras. Debido a este

proceso, las fibras sufren variaciones que inducen la contracción y la disminución de la capacidad de retención de agua. Estos efectos están relacionados con una mejora de la adhesión de la matriz de fibra y una menor absorción de compuestos que dañan la fibra.

El comportamiento mecánico de las muestras después del curado parecía estar muy influenciado por el contenido de MK, donde la muestra sin MK presentó el mejor rendimiento. Sin embargo, estas diferencias se redujeron después del envejecimiento. En este caso, como se puede observar en la figura IV 19 b las curvas de flexión fueron similares para los compuestos con matrices que contienen hasta 30% de MK, y solo ligeramente, y progresivamente, reducidas para aquellos compuestos con matrices de 40MK y 50MK.

Por otro lado, las curvas de las muestras envejecidas revelaron una reducción de ~ 21% en la deflexión de tramo medio soportable por los compuestos. Sin embargo, el envejecimiento de los materiales compuestos no pareció afectar la resistencia de la fibra, debido a los valores similares de resistencia máxima

a la flexión revelados por las muestras y sus contrapartes envejecidas.

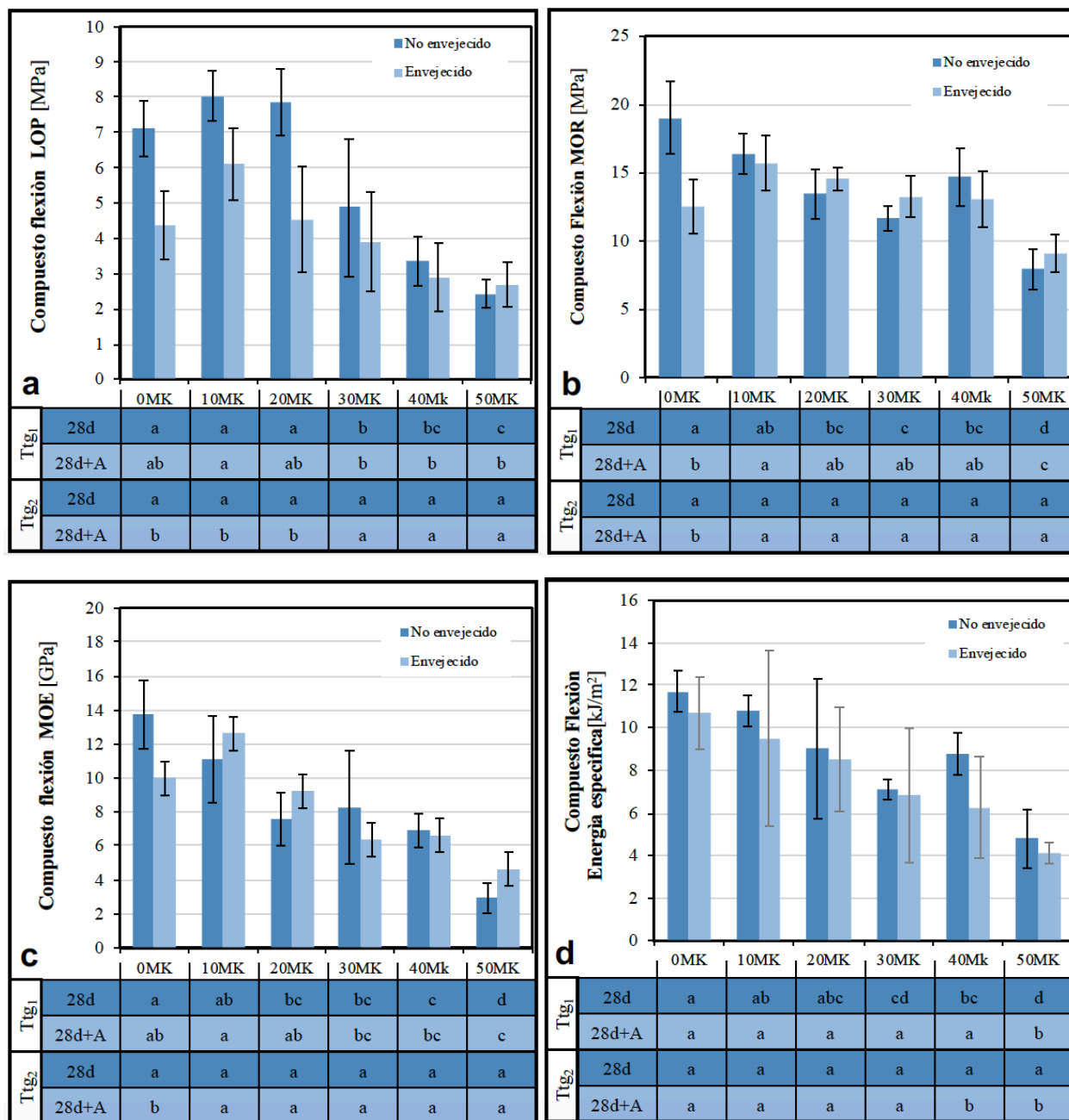


Figura IV-20 Resultados de caracterización mecánica de (a) LOP, (b) MOR, (c) MOE y (d) energía de fractura específica para los compuestos de matriz CAC y refuerzo de fieltro (NW) con contenidos crecientes de MK (de 0% a 50%) antes (no envejecido) y después de un envejecimiento acelerado (envejecido). Las tablas inferiores corresponden a la agrupación de categoría según Tukey.

A partir de estas pruebas de flexión, se determinaron los valores de LOP, MOR, MOE y energía de fractura específica; Los resultados se presentan en el Figura IV-20.

El comportamiento mecánico de las muestras después del curado parecía estar muy influenciado por el contenido de MK, donde la muestra sin MK presentó el mejor rendimiento. Sin embargo, estas diferencias se redujeron después del envejecimiento. En este caso, como se puede observar en la figura IV-19, las curvas de flexión fueron similares para los compuestos con matrices que contienen hasta 30% de MK, y solo ligeramente, y progresivamente, reducidas para aquellos compuestos con matrices de 40MK y 50MK.

Por otro lado, las curvas de las muestras envejecidas revelaron una reducción de ~ 21% en la deflexión de tramo medio soportable por los compuestos. Sin embargo, el envejecimiento de los compuestos no pareció afectar la resistencia de la fibra, debido a los valores similares de resistencia máxima a la flexión revelados por las muestras y sus contrapartes envejecidas.

Un primer ANOVA comparó diferentes contenidos de MK entre la misma condición (no envejecida o envejecida), donde  $Ttg_1$  proporciona los grupos de significación de su correspondiente prueba Tukey HSD. Un segundo ANOVA comparó las muestras antes (no envejecidas) y después del envejecimiento (envejecidas) para el mismo contenido de MK, donde  $Ttg_2$  proporciona los grupos significativos de su correspondiente prueba Tukey HSD. Los valores entre paréntesis corresponden a las desviaciones estándar.

Como se muestra en Figura IV-20 a, se encontró un LOP máximo para la muestra de 10MK, aunque la prueba Tukey HSD no revela diferencias significativas en el rango de 0-20MK ( $Ttg_1$ ) Los valores de LOP de este grupo de 0-20MK fueron casi el doble que los de las otras muestras donde las medias fueron significativamente diferentes. Por lo tanto, la adición de hasta un 20% de MK a la matriz CAC tuvo un efecto menor en el límite de proporcionalidad de los compuestos. De lo contrario, en términos generales, los valores de LOP disminuyeron con el envejecimiento, aunque la diferencia entre las muestras no envejecidas y

envejecidas para cada compuesto pareció nivelarse al aumentar el contenido de MK. Dado que el LOP es el parámetro mecánico del material compuesto con una mejor correspondencia con el comportamiento de la matriz, los resultados obtenidos son consistentes con la pérdida de la resistencia de la matriz explicada previamente para el rendimiento mecánico de la matriz no reforzada (Sección IV.1.1.4).

Con respecto al MOR Figura IV-20 b), se observa una tendencia decreciente en la resistencia con el contenido de MK. Esta disminución progresiva se muestra en la superposición de grupos entre 0MK y 40MK, donde las diferencias significativas ( $T_{tg} \text{ }_1$ ) se observan cuando se comparan muestras con una variación de contenido MK del 20%, y no cuando estas variaciones son solo del 10%. De lo contrario, se observó una caída en el valor MOR para el compuesto 50MK / NW, que fue significativamente diferente del resto. No obstante, todas las muestras envejecidas presentaron fortalezas similares a sus contrapartes no envejecidas, excepto la muestra 0MK / NW, lo que indica un bajo efecto del envejecimiento acelerado en la MOR de los compuestos cuando se

agrega MK. El menor efecto del envejecimiento es consistente con una reducción del contenido de cemento y, por lo tanto, con un menor daño de la fibra.

De manera similar, con respecto al módulo elástico, la adición de MK condujo a una reducción de los valores de MOE para los compuestos no envejecidos. Los valores de MOE para los compuestos envejecidos presentaron una tendencia similar, aunque las diferencias entre sus contrapartes no envejecidas fueron menores en aquellas muestras que contenían MK. Finalmente, con respecto a la energía de fractura específica, se encontró que su valor medio disminuyó significativamente al aumentar el contenido de MK en compuestos no envejecidos. Sin embargo, esta fue una disminución lentamente progresiva, como lo demuestra el alto nivel de superposición de grupos obtenido en la prueba de Tukey ( $T_{tg} \text{ }_1$ ). Para las muestras envejecidas, aunque la disminución en el valor medio, las diferencias no fueron significativas hasta un contenido de 40MK. La muestra 50MK fue significativamente diferente al resto.



Con respecto a la durabilidad del material, como se puede observar en la Figura IV-20, la prueba Tukey HSD entre las muestras envejecidas y no envejecidas en cada nivel de contenido de MK ( $T_{tg_2}$ ) muestran un valor de LOP significativamente diferente para las muestras 0MK, 10MK y 20MK, y valores de MOR y MOE significativamente diferentes solo para 0MK.

Las diferencias significativas encontradas para los resultados de LOP podrían atribuirse a una mayor degradación de la fibra causada por las matrices, debido al menor contenido de MK, que podría haber inducido la formación de grietas a menor tensión, lo que requeriría un estudio más profundo.

Este efecto podría tener una influencia menor en los otros parámetros, especialmente en la energía de fractura específica, donde se encontraron diferencias no significativas independientemente del contenido de MK, lo que demuestra la alta ductilidad, el comportamiento SHCC y la durabilidad al ciclo húmedo / seco de los materiales desarrollados en esta investigación.

Por lo tanto, la adición de MK redujo tanto la resistencia, la rigidez y la tenacidad de los compuestos, porque MK solo actúa como relleno y no contribuye a la formación de compuestos de unión. Además, según los resultados, la adición de MK redujo la influencia del envejecimiento en los valores MOR y MOE de los compuestos, e incluso un 10% de MK mejoró los valores LOP, MOR y MOE de las muestras envejecidas sin afectar sus valores específicos. energía de fractura

#### **IV.1.3.2 Ciclo Hielo-deshielo.**

Para determinar la resistencia que presentan nuestras probetas ante este ataque, se procedieron a pesar cada una de las probetas antes y después de ser sometidas a los ciclos.

Una vez obtenidos ambos valores, se procede a dividir la pérdida de la masa entre el total de la medida de las probetas y del tamaño del molde (  $2 \times 30 \times 30$  mas  $4 \times 30 \times 1,5$  ) (del molde) ) siendo el  $1,980 \text{ cm}^2$ , se convierte a  $\text{m}^2$  que serían unos  $0,1980 \text{ m}^2$ . Se divide la pérdida de la masa entre el resultado anterior y si este valor resulta ser menor que  $1 \text{ kg/ m}^2$ , cumple.

De acuerdo a este dato podemos decir, que la probeta con un 40% de contenido de MK no cumple. Si analizamos los datos en la Tabla IV-2 vemos que esta probeta tenía la capa superficial mas grande por lo que no solo tiene mas contenido de MK sino que al pesar mas pierde mas al ser sometida a este ciclo.

El deterioro del hormigón por ciclos hielo/deshielo presenciado en este estudio es más notorio en mezclas que sobrepasan de una sustitución de un 40% de CAC.

La sal, afecta mucho a la superficie. Si la capa superficial es mucho mas gruesa, se pierde mucho mas.

En general, la mezcla que mejor ha funcionado es la 10% Mk, la degradación que presenta es mínima.

La tendencia es que vayan aumentando Las únicas que no se mantienen la tendencia son las dos que mas pesaban; las de 40%MK y las de 50%MK.

La fibra juega un papel fundamental en este material compuesto. Esta ha hecho una especie de cocido con la superficie y ha evitado que se resquebraje, aun siendo esas dos probeta las mas gruesas.

Tabla IV-2 Relación de peso hielo-deshielo

CAC	MK	Peso seco antes de ser sometidas	Peso seco finalizado el ciclo	Pérdida (g)	Resultado (g/m2)	% Respecto inicio
100	0	1980,91	1922,80	58,11	293,48	0,029
90	10	1970,8	1934,85	38,95	181,57	0,019
80	20	1957	1902,95	54,05	272,98	0,027
70	30	1836,84	1783,15	53,69	271,16	0,029
60	40	2487,98	2192,00	295,98	1494,85	0,118
50	50	2090,5	1952,10	138,40	698,99	0,066

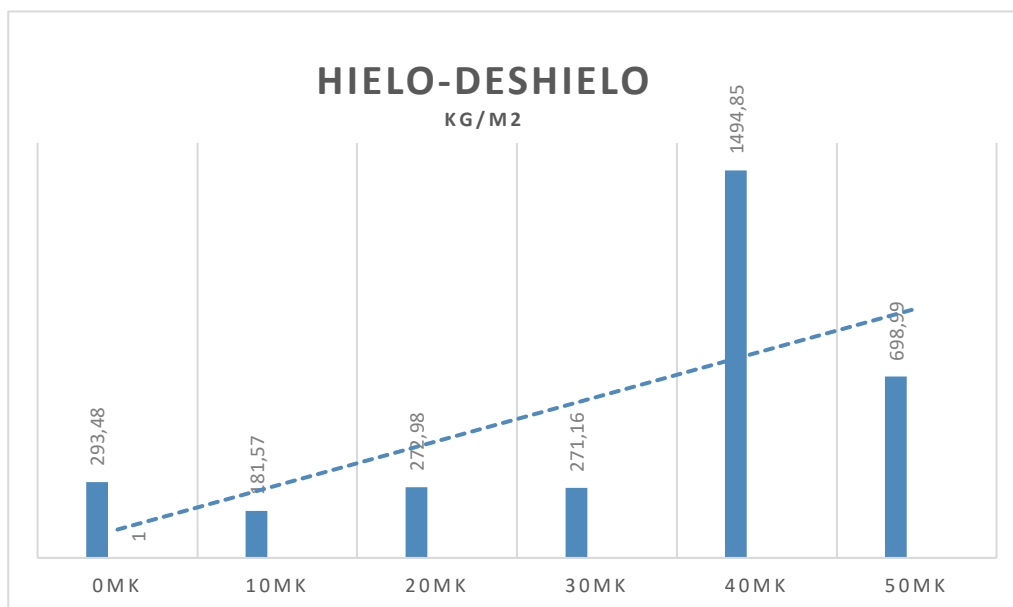


Figura IV-22 Relación hielo-deshielo de las composiciones

### IV.1.3.3 Resistencia al impacto.

La Figura IV-21 nos muestra el impacto mayor que resultó a nuestra probeta en la parte superficial, luego de ser ensayada a diferentes alturas.

Como nuestra baldosa presentaba textura o relieve mínimo, la fuimos ensayando dejando caer la bola de acero y subiéndolo gradual hasta la altura máxima de 100mm.

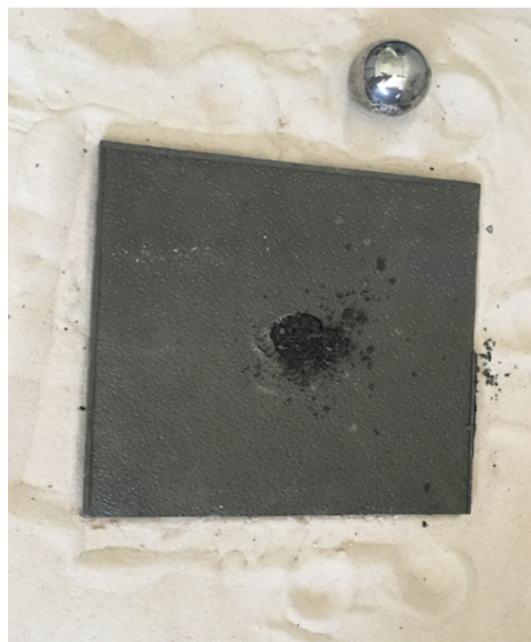


Figura IV-21 Estado de la probeta con mayor fisura.

Podemos decir, que nuestras probetas cumplen los requisitos, debido a que la rotura resultante no supera los parámetros establecidos, que dice que una baldosa se considera rota cuando, en su capa vista aparezca una hendidura de anchura igual o superior a 3mm, una longitud igual o superior a 50mm y profundidad igual o superior a 4mm.

Tabla IV-3 Valores de prueba de abrasión.

Composiciones	Valores (Media) de la huella	Factor de calibración	Valores de la huella	Valor final
100	21,19	+0,5	21,69	22
90-10	22,65	+0,5	22,66	23
80-20	20,34	+0,5	20,84	21
70-30	22,31	+0,5	22,81	23
40-60	20,4	+0,5	20,90	21
50-50	21,33	+0,5	21,83	22

#### IV.1.3.4 Resistencia al desgaste por abrasión.

El resultado del ensayo es la medida de la anchura de la huella, en su centro, corregida por el factor de calibración y redondeado a los 0,5 mm más cercanos.

De acuerdo a las clasificaciones de la norma UNE-EN 10025 según su uso, de y teniendo los resultados de la Tabla IV-3 nuestras probetas cumplen tanto para un uso normal ( $\leq 25$ ), como para un uso intensivo ( $\leq 23$ ).

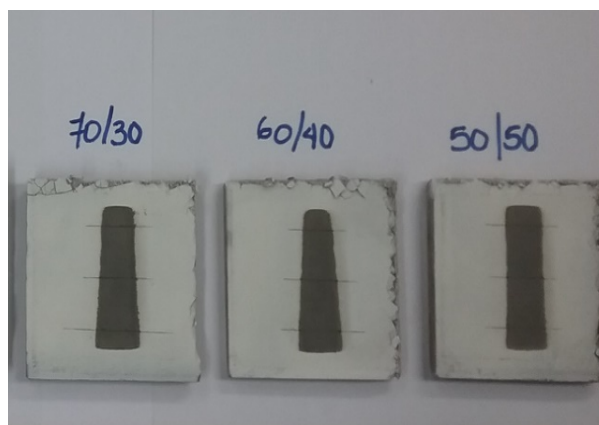
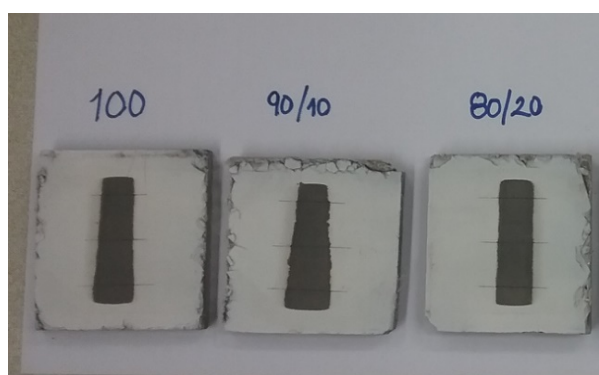


Figura IV-23 Probetas ensayadas

#### IV.1.4 Comparativa de probetas reforzadas con fieltro de fibra vegetal y con fibras sintéticas de polipropileno.

En este apartado mostramos los resultados obtenidos a unas muestras analizadas con una fibra sintética, fibra de polipropileno y las de fieltro de fibra de lino.

A las probetas de polipropileno solo le realizamos las pruebas de absorción, impacto y las de resistencia mecánica a 28 días y después del envejecimiento acelerado.

##### IV.1.4.1 Absorción.

Si vemos la figura IV-24 podemos comprobar que: a mayor relación a/c → mayor porosidad → mayor absorción. Cuanto mas pequeña sea la relación a/c, mas baja es la absorción.

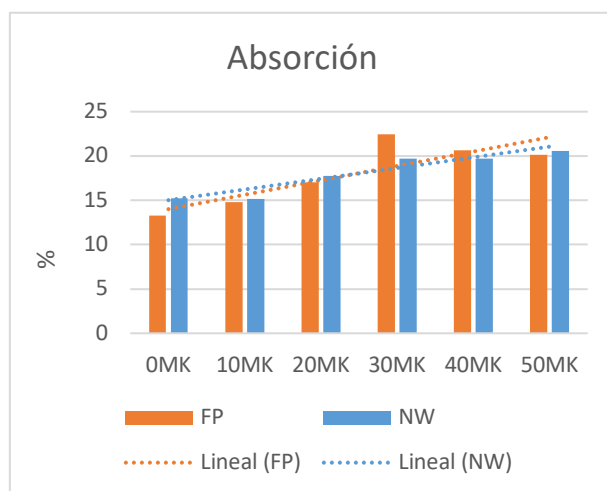
Tabla IV-4 Relación agua cemento final, para fibras vegetales y fibras sintéticas

NW fibra Vegetal a/c	FP fibra sintética de polipropileno a/c
0,37	0,32
0,40	0,39
0,43	0,41
0,49	0,55
0,47	0,49
0,48	0,46

Si nos preguntamos porque con la misma matriz, tenemos diferentes dosificaciones de agua es debido a que el MK tiene mucha capacidad de absorción de agua, por lo tanto a medida que aumentamos la cantidad de MK, la matriz nos retiene mas cantidad de agua y por eso vemos que las graficas van en orden ascendente.

Respecto a las fibras vegetales, generalmente son mas porosas puesto que retienen mas cantidad de agua.

figura IV-24 Absorción de NW y de FP.



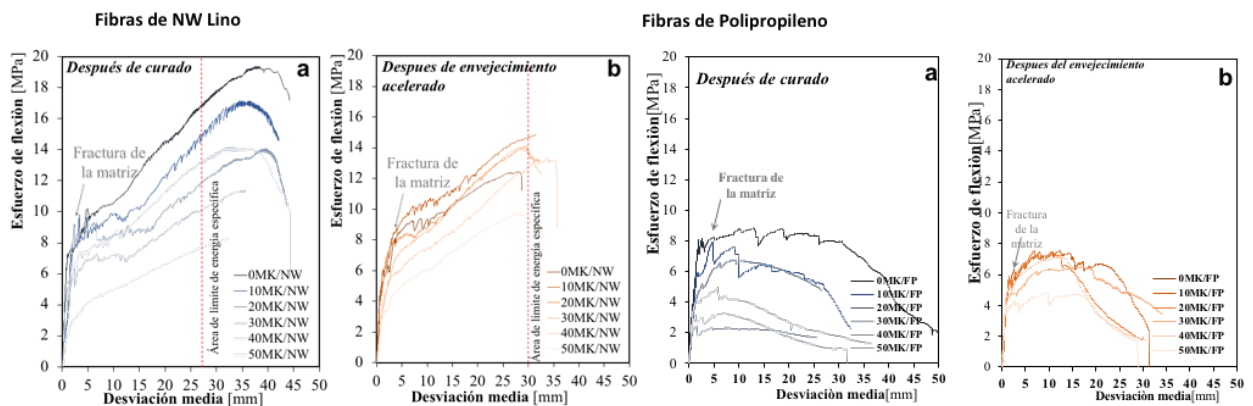
**IV.1.4.2 Propiedades mecánicas y durabilidad de las placas.**

Otro ensayo realizado como comparativa fue el de la resistencia mecánica a los 28 días y después del envejecimiento acelerado. Podemos apreciar en la Figura IV-25 que las probetas reforzadas con el fieltro tienen mejores prestaciones mecánicas.

de Abril del año 2017. Cabe destacar, que en su momento

solo se colocaron 5, correspondientes a las dosificaciones que iban con variaciones de 10%MK hasta %0% de MK.

Hoy en día, (3 años después) podemos observar que no presentan grietas ni



Comportamiento de flexión de las muestras después del curado durante 28 días (a), y después de un envejecimiento acelerado adicional (b).



Figura IV-25 Comparación de resistencia mecánica entre fibra vegetal y sintética antes y después de envejecida.

**IV.1.4.3 Ensayos de condiciones reales.**

Las probetas han sido colocadas en la entrada principal de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona ESAB el día 16

roturas, sin embargo, han perdido un poco de textura, siendo mas notorio en las de 50% de contenido de Mk.

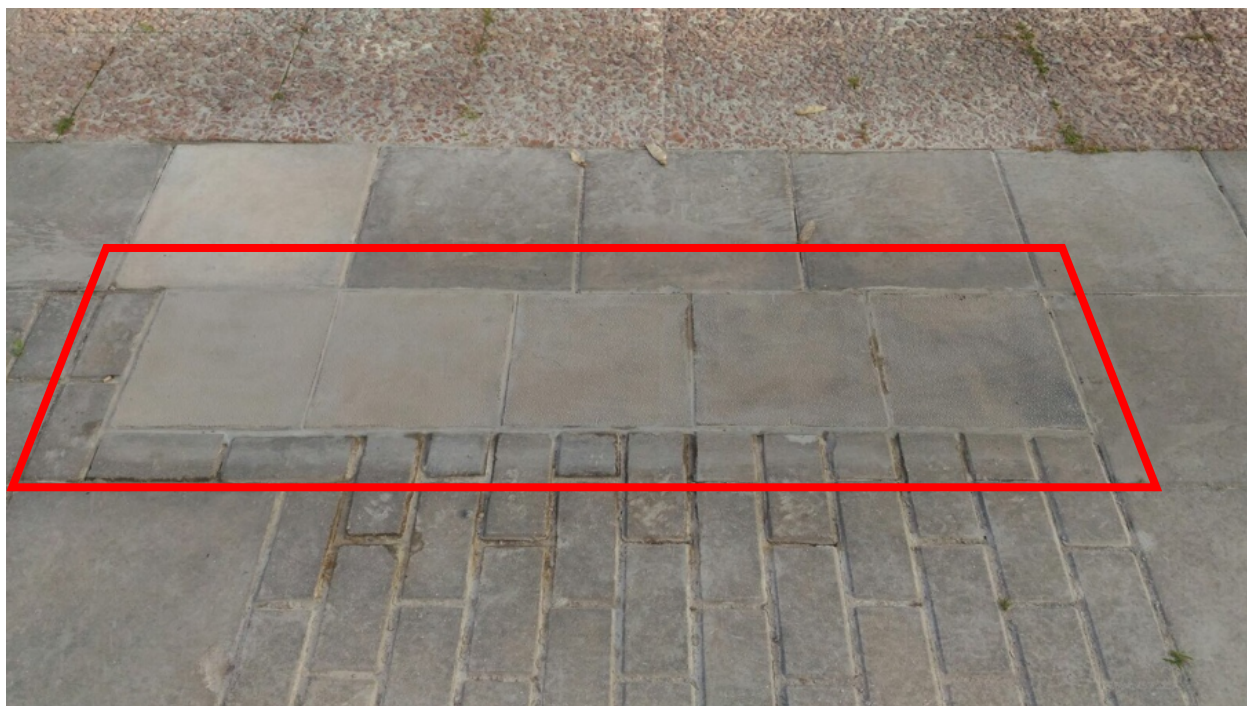


Figura IV-27 Probetas en ambiente real.

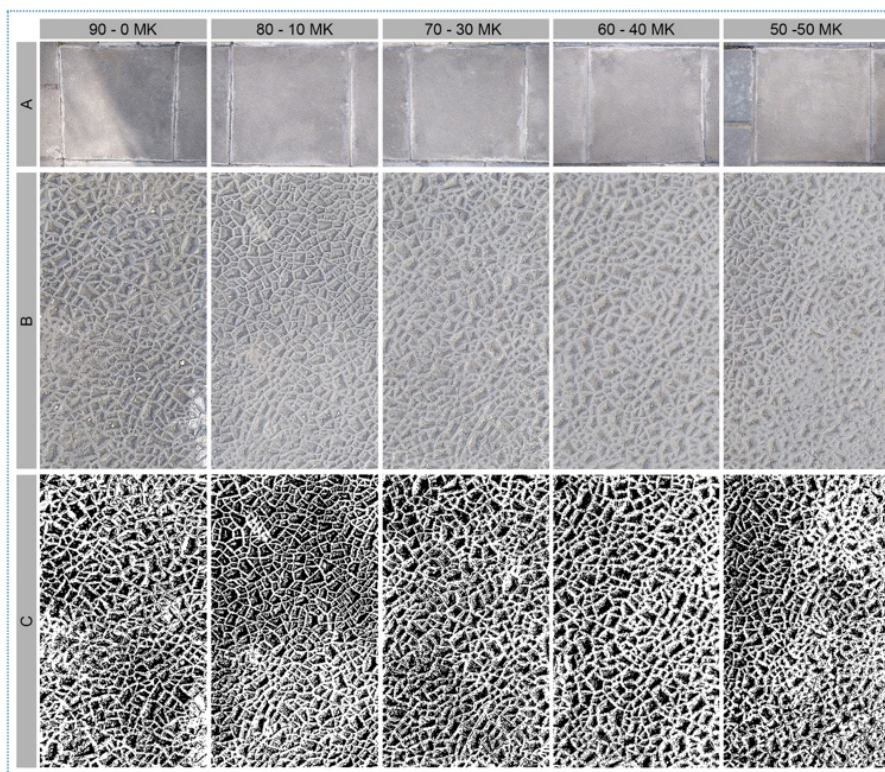


figura IV-26 Desgaste

CONCLUSIÓN



## Conclusión

En este estudio, se han desarrollado materiales compuestos de matrices basadas en CAC y telas no tejidas de fibra de lino como refuerzo.

Se ha estudiado el efecto del aumento del contenido de aditivo de metacaolín en matrices basadas en CAC. Los resultados mecánicos, BSEM y DRX confirmaron que este aditivo puzolánico no reaccionó con el CAC para formar nuevos compuestos o fases, y desempeñó el papel de un relleno, ayudando a nuclear la precipitación de las fases CAC y reduciendo la porosidad de la matriz.

Debido a esta falta de reacción, la adición de mayores cantidades de metacaolín en la mezcla de las matrices llevó a una reducción de los compuestos de unión y, por lo tanto, a una reducción del comportamiento mecánico de las matrices, que afectó a los compuestos. Por lo tanto, dado que no se logra una reacción puzolánica, el trabajo futuro podría reconsiderar el uso de este aditivo en el diseño de materiales compuestos, y se podrían evaluar otros aditivos alternativos con un proceso de fabricación más sostenible.

Por otro lado, la evaluación de los efectos de estas matrices basadas en CAC en el refuerzo de fibra vegetal reveló que las matrices CAC podrían ser una alternativa a las matrices de cemento Portland para la durabilidad de los refuerzos de fibra vegetal, ya que indujeron una menor degradación de la fibra que la de cemento Portland. Sin embargo, el alto costo de los cementos CAC obliga a la necesidad de aditivos o rellenos para reducir la cantidad de cemento requerido.

En este sentido, se ha observado que el aditivo de metacaolín utilizado en este estudio reduce aún más el daño de la fibra.

Respecto al rendimiento mecánico y la durabilidad de los compuestos definidos en este estudio, se encontró que todos los materiales presentaban un comportamiento de endurecimiento por deformación con una capacidad muy alta de deformación con formación de múltiples fisuras, señalando el uso de una matriz basada en CAC para Desarrollar compuestos de cemento de fibra natural duraderos. Además, se encontró que el envejecimiento acelerado parecía tener

un efecto mayor en la matriz que en las fibras.

La adición de MK disminuyó el efecto del envejecimiento en el rendimiento mecánico de los compuestos, reduciendo las diferencias en los valores MOR y MOE entre los estados sin envejecer y envejecidos. En este sentido, la adición de bajos contenidos de MK redujo el efecto del envejecimiento en los compuestos sin inducir una gran caída en la mayoría de las propiedades mecánicas, y se encontró un valor óptimo del 10% según los resultados obtenidos.

Finalmente, respecto a las pruebas de hielo- deshielo se concluye que cuanto mas fina sea la capa superficial, mejor comportamiento tienen las probetas.

BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Marcos, J. T. San José, J. Cuadrado, and P. Larrinaga, "Las patentes en la introducción del hormigón armado en España: Caso de estudio de la Alhóndiga de Bilbao," *Inf. la Constr.*, vol. 66, no. 534, 2014.
- [2] K. Abú-Shams and I. Pascal, "Características, propiedades, patogenia y fuentes de exposición del asbesto," *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, vol. 28, no. SUPPL. 1. pp. 7–11, 2005.
- [3] R. S. P. Coutts, "A review of Australian research into natural fibre cement composites," in *Cement and Concrete Composites*, 2005.
- [4] A. Llerena, "Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales," UPC, Barcelona, 2014.
- [5] O. Hardy-Hémery, "Éternit et les dangers de l'amiant-ciment, 1922-2006," *Revue d'Histoire Moderne et Contemporaine*, vol. 56, no. 1. Editions Belin et Herscher, pp. 197–226, 06-Apr-2009.
- [6] M. D. Campbell and R. S. P. Coutts, "Wood fibre-reinforced cement composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 8, pp. 1962–1970, Aug. 1980.
- [7] P. T. C. Harrison, L. S. Levy, G. Patrick, G. H. Pigott, and L. L. Smith, "Comparative hazards of chrysotile asbestos and its substitutes: A European perspective," *Environmental Health Perspectives*, vol. 107, no. 8. Public Health Services, US Dept of Health and Human Services, pp. 607–611, 1999.
- [8] Claramunt Blanes Josep, "Utilització de fibres vegetals per a l'elaboració de morters de ciment d'altas prestaciones (SHCC).," universidad politecnica de cataluña, 2011.
- [9] C. Reyes Najera, "Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fi bras de maíz, para componentes de viviendas de bajo coste.," 2009.
- [10] Mike Hyon, "The Best Brands of Fiber-Cement Siding for Your Home," 2019.
- [11] Sabanés Hernández María Alethia., "Uso de no tejidos de fibras en matrices de cemento para materiales de construcción.," 2013.
- [12] R. Sri Ravindrarajah, Y. H. Loo, and C. T. Tam, "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 39, no. 141, pp. 214–220, Dec. 1987.
- [13] E. González Arias, "Nueva técnica de dosificación de hormigones reciclados [Recurs electrònic] : Método del volumen de mortero equivalente," 2012.
- [14] A. Zaragoza, "Circuito cerrado para una industria sostenible, aportaciones del sector cementero," *Inf. la Constr.*, vol. 62, no. 517, pp. 53–59, 2010.
- [15] A. Frohmann, "HUELLA DE CARBONO, EXPORTACIONES Y ESTRATEGIAS EMPRESARIALES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO."
- [16] M. Yu, T. Wiedmann, R. Crawford, and C. Tait, "The Carbon Footprint of Australia's Construction Sector," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 180, pp. 211–220.
- [17] H. Schneider and J. Samaniego, "La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios."
- [18] T. del Rosario Argúello Méndez and A. C. Burgos, "Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 × 10 Con Techo-Chiapas del CYTED," *Inf. la*

- Constr.*, vol. 60, no. 509, pp. 25–34, 2008.
- [19] R. B. (n. d. ). Mundo, "Las 3 razones por las que el diseño de las ciudades de América Latina detiene el progreso de la región - BBC Mundo. Retrieved December 23, 2017," 2017. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41261246>. [Accessed: 07-Feb-2020].
- [20] C. Campoverde, "Análisis y diagnóstico de nuevas políticas de vivienda social en el Ecuador," 2015.
- [21] M. Velasco, "Contribución de la vivienda popular al desarrollo integral de las familias en Pereira," *Arquetipo*, no. 6, pp. 51–72, 2013.
- [22] S. Serrano, ; Oteiza, and S. José, *LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ANTE LAS INGENTES NECESIDADES DE HÁBITAT EN EL TERCER MUNDO (CARENCIAS DE UNA INVESTIGACIÓN NECESARIA) 1. CONSTRUCTION MATERIALS: FACING THE THIRD WORLD'S VAST HOUSING NEEDS (SHORTCOMINGS IN NECESSARY RESEARCH)*. .
- [23] ONU, "Informe de la Relatora Especial sobre una vivienda adecuada como elemento integrante del derecho a un nivel de vida adecuado y sobre el derecho de no discriminación a este respecto," *Boletín la Soc. Geológica Mex.*, vol. 4, no. 1, 1908.
- [24] J.R.Montserrat, "Aprofitament dels subproductes dels cereals," 3er. *Congrés català d'enginyeria a la indústria Aliment.*, 2000.
- [25] F. Pérez B., A. Méndez G., A. Lagos R., and S. L. Vargas M., "Dinámica y patología del barrido mucociliar como mecanismo defensivo del pulmón y alternativas farmacológicas de tratamiento," *Revista Medica de Chile*, vol. 142, no. 5. Sociedad Medica de Santiago, pp. 606–615, 2014.
- [26] M. R. Becklake, E. Bagatin, and J. A. Neder, "Asbestos-related diseases of the lungs and pleura: uses, trends and management over the last century," 2007.
- [27] I. Montes *et al.*, "Normativa sobre el asbesto y sus enfermedades pleuropulmonares," *Arch. Bronconeumol.*, vol. 41, no. 3, pp. 153–168, 2005.
- [28] "BOE núm 86 de 11/4/2006.," 2006.
- [29] M. García Gómez, A. Menéndez-Navarro, and R. Castañeda López, "Incidencia en España de la asbestosis y otras enfermedades pulmonares benignas debidas al amianto durante el período 1962-2010," *Rev. Esp. Salud Publica*, vol. 86, pp. 613–625, 2012.
- [30] "Documento BOE-A-1978-5972," vol. 51, pp. 4840–4844, 1978.
- [31] G. Luis, C. Hernández, C. Rubio, I. Frías, A. Gutiérrez, and A. Hardisson, "Toxicología del asbesto," *Cuad. Med. Forense*, no. 57, Jul. 2009.
- [32] "BOE núm 299 de 14/12/2001.," 2001.
- [33] A. Borsani and M. Silvia, "MATERIALES ECOLÓGICOS ESTRATEGIAS, ALCANCE Y APLICACIÓN DE LOS MATERIALES ECOLÓGICOS COMO GENERADORES DE HÁBITATS URBANOS SOSTENIBLES," universidad politecnica de cataluña, 2011.
- [34] J. R. Krause, *Fibre cement : technology and design*. Birkhäuser, Publishers for Architecture, 2007.
- [35] Jeremy David J, "Corporate Responses to the Emergent Recognition of a Health Hazard in the UK Asbestos Industry: The Case of Turner & Newall, 1920-1960," *JSTOR*, vol. 24 no. 1, pp. 254–265, 1995.
- [36] A. F. Blanxart, "NTP 306: Las fibras

- alternativas al amianto: consideraciones generales," 1993.
- [37] P. Hannant, "Fibre cements and fibre concretes," 1978.
- [38] A. Hodgson, "Alternatives to asbestos and asbestos products.," 1987.
- [39] S. F. Santos, G. H. D. Tonoli, J. E. B. Mejia, J. Fiorelli, and H. S. Jr, "Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers : A review of strategies to improve durability," vol. 65, no. 317, 2015.
- [40] K. Ghavami, "Bamboo as reinforcement in structural concrete elements," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 6, pp. 637–649, 2005.
- [41] V. K. Mathur, "Composite materials from local resources," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 7, pp. 470–477, 2006.
- [42] D. A. Brautigam, "Foreign Assistance and the Export of Ideas: Chinese Development Aid in The Gambia and Sierra Leone," *J. Commonw. Comp. Polit.*, vol. 32, no. 3, pp. 324–348, Nov. 1994.
- [43] B. J. Mohr, "Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 4, p. 435, 2005.
- [44] R. Jarabo, E. Fuente, M. C. Monte, H. Savastano, P. Mutjé, and C. Negro, "Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties," *Ind. Crops Prod.*, vol. 39, pp. 89–96, Sep. 2012.
- [45] M. Ardanuy, J. Claramunt, J. A. García-Hortal, and M. Barra, "Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers," *Cellulose*, 2011.
- [46] G. Ramakrishna, "Evaluation of durability of natural fibre reinforced cement mortar composite-A new approach," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 6, pp. 44–51, 2010.
- [47] V. Agopyan, H. Savastano, V. M. John, and M. A. Cincotto, "Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview," in *Cement and Concrete Composites*, 2005.
- [48] N. G. Ozerkan, B. Ahsan, S. Mansour, and S. R. Iyengar, "Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 2, no. 2, pp. 131–142, Dec. 2013.
- [49] P. N. Balaguru and S. P. (Surendra P. . Shah, *Fiber-reinforced cement composites*. McGraw-Hill, 1992.
- [50] J. Wei and C. Meyer, "Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites," *Cem. Concr. Res.*, vol. 73, pp. 1–16, 2015.
- [51] M. A. J. Claramunt, H. Ventura, F. Parés, "Natural fibre nonwovens as reinforcement for cement mortar composites, in: R. Figueiro (Ed.), B. Abstr. 1st Int. Conf. Nat. Fibers Sustain. Mater. Adv. Appl., Universidade do Minho," pp. 191–192., 2013.
- [52] A. Hakamy, F. U. A. Shaikh, and I. M. Low, "Effect of calcined nanoclay on the durability of NaOH treated hemp fabric-reinforced cement nanocomposites," *Mater. Des.*, vol. 92, pp. 659–666, Feb. 2016.
- [53] J. Wei and C. Meyer, "Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber," *Cem. Concr. Res.*, vol. 81, pp. 94–111, Mar. 2016.
- [54] F. R. Tolêdo Romildo, K. Ghavami, G. L. England, and K. Scrivener, "Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability," *Cem. Concr. Compos.*,

- vol. 25, no. 2, pp. 185–196, 2003.
- [55] B. J. Mohr, H. Nanko, and K. E. Kurtis, "Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 435–448, Apr. 2005.
- [56] V. Agopyan, "Vegetable fibre reinforced building materials. Developments in Brazil and other latin american countries Natural fibre reinforced cement and concrete," vol. 1988.
- [57] R. Decreto, R. Decreto, and R. Decreto, "Documento BOE-A-2000-1409," pp. 3016–3017, 2000.
- [58] J. M. Rivas Mercury, A. H. De Aza, X. Turrillas, and P. Pena, "Hidratación de los cementos de aluminatos de calcio (Parte I)," *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 42, no. 5, pp. 269–276, 2003.
- [59] S. Chinchón and M. Sanjuán, *El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados*. 2008.
- [60] D. Torrens Martín, "Mezclas ternarias de cemento Portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato cálcico: mecanismos de expansión," 2013.
- [61] K. Scrivener, A. Capmas, "Calcium aluminate cements, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chem.*," *Cem. Concr., Elsevier Ltd*, pp. 713–782, 2004.
- [62] Matthew P. Adams, "Factors Influencing Conversion and Volume Stability in Calcium Aluminate Cement Systems," 2015.
- [63] S. F. Santos, G. H. D. Tonoli, J. E. B. Mejia, J. Fiorelli, and H. Savastano, "Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: A review of strategies to improve durability," *Mater. Constr.*, vol. 65, no. 317, p. e041, 2015.
- [64] K. Scrivener, *Calcium aluminate cements*, Fourth Edi. Elsevier Ltd., 2003.
- [65] K. L. Scrivener, J. L. Cabiron, and R. Letourneux, "High-performance concretes from calcium aluminate cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1215–1223, Aug. 1999.
- [66] K.L. Scrivener, A. Capmas, "Calcium Aluminate Cements, Fourth Edi, Elsevier Ltd.," 2001.
- [67] K. L. Scrivener, "Historical and present day applications of calcium aluminate cements, in: R.J. Mangabhai, F.P. Glasser (Eds.) *Proceedings of the International Conference on Calcium Aluminate Cements (CAC)*, IOM Communications, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland," pp. 3–23.
- [68] R. D. Tolêdo Filho, K. Scrivener, G. L. England, and K. Ghavami, "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 2, pp. 127–143, Apr. 2000.
- [69] P. Rivas-Mercury, J. M.; Aza Moya, Antonio H. de ; Turrillas, Xavier ; Pena, "Hidratación de los cementos de aluminatos de calcio (Parte I)," *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.* 42(5), pp. 269–276, 2003.
- [70] T. R. . Kostuch, J. A.; Walters, V.; Jones, "High performance concretes incorporating metakaolin: a Review"," *Concr. 2000 E&FN Spon*, pp. 1799–1811, 1993.
- [71] J. M. . Sabir, B. B.; Wild, S.; Khatib, "'On the workability and strength development of metakaolin concrete'," *Concr. Environ. Enhanc. Prot. , E&FN Spon*, pp. 651–656, 1996.
- [72] F. Curcio, B. A. DeAngelis, and S. Pagliolico, "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 6, pp. 803–

- 809, 1998.
- [73] B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, 2001.
- [74] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Applied Clay Science*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, Mar-2009.
- [75] and M. G. A. Bonakdar, M. Bakhshi, "Properties of High-Performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin Reactivity Metakaolin," pp. 287–296, 2005.
- [76] H. S. . Razak, H. A.; Wong, "'Effect of incorporating metakaolin on fresh and hardened properties of concrete' .," *SP-200, ACI, Farmingt. Hills, Mich.*, pp. 309–324, 2001.
- [77] E. . Justice, J. M.; Kennsion, L. H.; Mohr, B. J.; Beckwith, S. L.; McCormick, L. E.; Wiggins, B.; Zhang, K. Z. Z.; Kurtis, "'Comparison of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials' .," *SP-228, ACI, Farmingt. Hills, Mich.*, pp. 213–236, 2005.
- [78] R. G. . Caldarone, M. A; Gruber, K. A.; Burg, "'High reactivity metakaolin: A new generation mineral admixture'," *Concr. Int. vol. 16, n° 11*, pp. 37-40., 1994.
- [79] K. A. . Caldarone, M. A.; Gruber, "'High reactivity metakaolin - a mineral admixture for high-performance concrete'," *Proc. Int. Conf. Concr. under Sev. Cond. Environ. Loading, Sapporo, Japan, vol. 2*, pp. 1015–1024, 1995.
- [80] V. M. Zhang, M. H; Malhotra, "'Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete'," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, n° 8, pp. 1713–1725, 1995.
- [81] J. M. Bai, J.; Wild, S.; B. B. Sabir, B. B.; Kinuthia, "'Workability of concrete incorporating pulverized fuel ash and metakaolin'," *Mag. Concr. Res.*, vol. 51, n, pp. 207–216, 1999.
- [82] L. J. . Wild, S.; Khatib, J. M.; Roose, "'Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement-metakaolin pastes'," *Adv. Cem. Res.*, vol. 10, n, pp. 109-119., 1998.
- [83] K. A. . G. Boddy, R.D.; Hooton, "'Long-Term testing of the chloride penetration resistance of concrete containing high reactivity metakaolin'," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, n, pp. 759–765, 2001.
- [84] J. M. . K. K. E. . Justice, "'Influence of metakaolin surface area on properties of cement-based materials'," *ASCE, J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, n, pp. 762-771., 2007.
- [85] R. Abbas, S. A. Abo-El-Enein, and E. S. Ezzat, "Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: Mortero y hormigón," *Mater. Constr.*, vol. 60, no. 300, pp. 33–49, 2010.
- [86] H. Savastano, P. G. Warden, and R. S. P. Coutts, "Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 5, pp. 379–384, 2000.
- [87] M. A. Sabanés Hernández, "Uso de No Tejidos de Fibras Vegetales en Matrices de Cemento para Materiales de Construcción," Universidad Politécnica de Cataluña , 2013.
- [88] C. A. Juárez Alvarado, P. Rodríguez López, R. Rivera Villarreal, and V. Roth, "Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto Ma. de los Ángeles Rechy de," 2004.
- [89] S. M. Velásquez Restrepo, G. J. Pelaéz Arroyave, and D. H. Giraldo Vásquez, "Uso de fibras vegetales



- en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos," p. 10, 2016.
- [90] H. Savastano, Jr., "Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites," *Mater. Struct.*, vol. 35, no. 245, pp. 64–68, 2001.
- [91] V. Agopyan, H. Savastano, V. M. John, and M. A. Cincotto, "Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview," in *Cement and Concrete Composites*, 2005, vol. 27, no. 5, pp. 527–536.
- [92] G. Ramakrishna, T. Sundararajan, and S. Kothandaraman, "Evaluation of durability of natural fibre reinforced cement mortar composite- a new approach," vol. 5, no. 6, 2010.
- [93] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R. D. Toledo Filho, "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, Mar. 2015.
- [94] J. Claramunt, L. J. Fernández-Carrasco, H. Ventura, and M. Ardanuy, "Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 230–239, Jul. 2016.
- [95] J. Claramunt, M. Ardanuy, J. A. García-Hortal, and R. D. T. Filho, "The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 586–595, 2011.
- [96] J. Claramunt, H. Ventura, F. Pares, M. Ardanuy, F. Parés, and M. Ardanuy, "Estructuras no tejidas de fibras naturales como refuerzo para compuestos de cemento de elevada ductilidad," *Actas del X Congr. Nac. Mater. Compuestos*, pp. 317–322, 2013.
- [97] A. D. Bawden and R. P. Kibblewhite, "Effects of multiple drying treatments on kraft fibre walls," *Journal of Pulp and Paper Science*, vol. 23, no. 7. 1997.
- [98] P. Weise, "Effect of drying and rewetting cycles on fibre swelling." 1999.
- [99] C. A. Juárez Alvarado, J. R. Gonzalez Lopez, J. M. Mendoza, and A. A. Zaldivar Cadena, "Low impact fiber reinforced material composite," *Rev. ALCONPAT*, vol. 7, no. 2, pp. 135–147, May 2017.
- [100] K. G. Satyanarayana, G. G. C. Arizaga, and F. Wypych, "Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview," *Progress in Polymer Science (Oxford)*, vol. 34, no. 9. Pergamon, pp. 982–1021, 01-Sep-2009.
- [101] M. Torres and F. Fernández, "Estudio de la influencia del medio alcalino en la estructura y elongación de las fibras de henequén ( Agave fourcroydes Lemaire ) Study of the influence of alkaline medium on the structure and," 2016.
- [102] P. A. Villegas-Silva, T. Toledano-Thompson, B. B. Canto-Canché, A. Larqué-Saavedra, and L. F. Barahona-Pérez, "Hydrolysis of Agave fourcroydes Lemaire (henequen) leaf juice and fermentation with *Kluyveromyces marxianus* for ethanol production," *BMC Biotechnol.*, vol. 14, no. 1, p. 14, Feb. 2014.
- [103] S. M. Velásquez Restrepo, G. J. Pelaéz Arroyave, and D. H. Giraldo Vásquez, "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos," *Inf. Técnico*, vol. 80, no. 1, p. 77, Jun. 2016.

- [104] M. Buggy, "Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Edited by Amar K Mohanty, Manjusri Misra and Lawrence T Drzal," *Polym. Int.*, vol. 55, no. 12, pp. 1462–1462, Dec. 2006.
- [105] H.E. Gram, *Durability of natural fibres in concrete*. 1983.
- [106] Salvador, Amigo, Nuez, Sahuquillo, Llorens, and Marti, "Caracterización De Fibras Vegetales Utilizadas Como Refuerzo En Matrices Termoplásticas," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 4, pp. 573–580, 2017.
- [107] G. H. D. Tonoli, S. F. Santos, H. Savastano, S. Delvasto, R. Mejía De Gutiérrez, and M. D. M. Lopez De Murphy, "Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 225–232, 2011.
- [108] J. D. A. M. Filho, F. D. A. Silva, and R. D. Toledo Filho, "Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 40, pp. 30–39, Jul. 2013.
- [109] B. J. Mohr, J. J. Biernacki, and K. E. Kurtis, "Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 11, pp. 1531–1543, Nov. 2007.
- [110] H.E. Gram, "Durability of natural fibres in concrete, In natural fibre reinforced cement and concrete.," vol. V, first E, pp. 143–172, 1988.
- [111] O. A. Cevallos, "Sustainable Fabric-reinforced cementitious composites for the strengthening of masonry elements . Calabria: Ph D Thesis in Materials and Structures Engineering : University of Calabria.," 2015.
- [112] I. García, "Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH," 2011.
- [113] B. Barra, B. Paulo, C. Alves, H. Savastano, and K. Ghavami, "Effects of methane cold plasma in sisal fibers," in *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 517, pp. 458–468.
- [114] K. Bilba and M. A. Arsene, "Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 9, pp. 1488–1495, Sep. 2008.
- [115] M. Abdelmouleh, S. Boufi, A. Ben Salah, M. N. Belgacem, and A. Gandini, "Interaction of silane coupling agents with cellulose," *Langmuir*, vol. 18, no. 8, pp. 3203–3208, Apr. 2002.
- [116] G. H. D. Tonoli, M. N. Belgacem, G. Siqueira, J. Bras, H. Savastano, and F. A. Rocco Lahr, "Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 68–75, Mar. 2013.
- [117] J. Claramunt, M. Ardanuy, J.A. García-Hortal, "Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 79, pp. 200–205., 2010.
- [118] A. A. Brancato, "EFFECT OF PROGRESSIVE RECYCLING ON CELLULOSE FIBER SURFACE PROPERTIES," 2008.
- [119] Q. Q. Wang *et al.*, "Evaluations of cellulose accessibilities of lignocelluloses by solute exclusion and protein adsorption techniques," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 109, no. 2, pp. 381–389, Feb. 2012.

- [120] K. L. Kato and R. E. Cameron, "A review of the relationship between thermally-accelerated ageing of paper and hornification," *Cellulose*, vol. 6, no. 1, pp. 23–40, 1999.
- [121] J. M. B. Fernandes Diniz, M. H. Gil, and J. a a M. Castro, "Hornification - Its origin and interpretation in wood pulps," *Wood Sci. Technol.*, vol. 37, no. 6, pp. 489–494, 2004.
- [122] G. H. D. Tonoli, S. F. Santos, A. P. Joaquim, and H. Savastano, "Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 193–201, Feb. 2010.
- [123] S. F. Santos, R. Schmidt, A. E. F. S. Almeida, G. H. D. Tonoli, and H. Savastano, "Cement & Concrete Composites Supercritical carbonation treatment on extruded fibre – cement reinforced with vegetable fibres," vol. 56, pp. 84–94, 2015.
- [124] G. H. D. Tonoli, S. F. Santos, A. P. Joaquim, and H. Savastano, "Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 193–201, Feb. 2010.
- [125] N. S. Mosier *et al.*, "Industrial scale-up of pH-controlled liquid hot water pretreatment of corn fiber for fuel ethanol production," *Appl. Biochem. Biotechnol. - Part A Enzym. Eng. Biotechnol.*, vol. 125, no. 2, pp. 77–97, May 2005.
- [126] Z. Fördős, "Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites Natural fibre reinforced cement and concrete," 1988.
- [127] C. L. Pereira *et al.*, "Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber," *Industrial Crops and Products*, vol. 49, pp. 88–96, Aug-2013.
- [128] G. Mármol, S. F. Santos, H. Savastano, M. V. Borrachero, J. Monzó, and J. Payá, "Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags," *Ind. Crops Prod.*, vol. 49, pp. 422–427, 2013.
- [129] R. S. Teixeira *et al.*, "Different ageing conditions on cementitious roofing tiles reinforced with alternative vegetable and synthetic fibres," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 47, no. 3, pp. 433–446, 2014.
- [130] R. Jarabo, M. C. Monte, E. Fuente, S. F. Santos, and C. Negro, "Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production," *Ind. Crops Prod.*, vol. 43, no. 1, pp. 832–839, May 2013.
- [131] J. Claramunt, M. Ardanuy, and J. A. García-Hortal, "Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites," *Carbohydr. Polym.*, 2010.
- [132] C. Gómez Hoyos, E. Cristia, and A. Vázquez, "Effect of cellulose microcrystalline particles on properties of cement based composites," *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 810–818, 2013.
- [133] A. E. F. S. Almeida, G. H. D. Tonoli, S. F. Santos, and H. Savastano, "Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 42, pp. 49–58, 2013.
- [134] J. Camilo Restrepo Gutiérrez, O. Jaime Restrepo Baena, and J. Iván Tobón, "EFFECTS OF THE ADDITION OF METAKAOLIN IN PORTLAND

- CEMENT," *Año*, vol. 73, pp. 131–141, 2006.
- [135] J. J. Dopico, F. M. Hernandez, R. L. Day, B. Middendorf, M. Gehrke, and L. Martinez, "Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 23, no. 3, pp. 171–178, 2008.
- [136] M. López and J. T. Castro, "Effect of natural pozzolans on porosity and pore connectivity of concrete with time," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 25, no. 3, pp. 419–431, 2010.
- [137] A. Bentur and S. A. S. Akers, "The microstructure and ageing of autoclaved cement composites," *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 11, no. 2, pp. 111–115, 1989.
- [138] C. M. R. Dias, M. a. Cincotto, H. Savastano, and V. M. John, "Long-term aging of fiber-cement corrugated sheets - The effect of carbonation, leaching and acid rain," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 4, pp. 255–265, 2008.
- [139] F. Cassagnabère, P. Diederich, M. Mouret, G. Escadeillas, and M. Lachemi, "Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, no. 1, pp. 95–107, Mar. 2013.
- [140] G. Guevara, G; Hidalgo, C; Pizarro, M; Rodríguez, I; Rojas, L; Segura, "Efecto de la variación agua/cemento en el concreto," *Tecnol. en Marcha.*, vol. Vol. 25, N, pp. 80–86, 2012.
- [141] X. L. Creus, "Durabilitat de les fibres vegetals en matrius de ciment d'aluminat de calç," 2017.
- [142] J. Claramunt, L. J. Fernandez-Carrasco, H. Ventura, and M. Ardanuy, "Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, 2016.
- [143] M. A. J. Claramunt, L.J. Fernandez-Carrasco, "Mechanical behavior of flax nonwoven cement composites, in: E. Schlangen, M.G. Sierra-Beltran, M. Lukovic, G. Ye (Eds.), SHCC3-Strain Hardening Cem. Compos. B. Proc., RILEM,,"
- [144] D. Pellicer Daviña and C. Sanz Larrea, *El Hormigón armado en la construcción arquitectónica*. Madrid : Bellisco, 2010.
- [145] J. Gong, J. Wu, and Z. Guan, "Examination of the indentation size effect in low-load vickers hardness testing of ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 19, no. 15, pp. 2625–2631, Nov. 1999.
- [146] M. Ramirez sanchez, "Pavimentos De Hormigon Con Micro Y Nano Fibras Vegetales : Comparativa Con Fibras De Polipropileno," 2015.
- [147] K. L. Scrivener, J. L. Cabiron, and R. Letourneux, "High-performance concretes from calcium aluminate cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1215–1223, 1999.
- [148] P. Gu, J.J. Beaudoin, E.G. Quinn, R.E. Myers, "Early Strength Development and Hydration of Ordinary Portland Cement/Calcium Aluminate Cement Pastes," *Adv. Cem. Based Mater.* 6, pp. 53–58, 1997.
- [149] T. Matusinović, J. Šipušić, and N. Vrbos, "Porosity-strength relation in calcium aluminate cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1801–1806, Nov. 2003.
- [150] I. Odler and M. Rößler, "Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration," *Cem. Concr. Res.*, vol. 15, no. 3, pp. 401–410, May 1985.

- 
- [151] M. Ardanuy, J. Claramunt, R. Dias, and T. Filho, "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, 2015.
- [152] J. Claramunt, H. Ventura, L. Fernández-Carrasco, and M. Ardanuy, "Tensile and Flexural Properties of Cement Composites Reinforced with Flax Nonwoven Fabrics," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 2, p. 215, Feb. 2017.
- [153] "J.E.M. Ballesteros, S.F. Santos, G. Mármol, H. Savastano, J. Fiorelli, Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, pp. 83–90., 2015.
- [154] J. E. M. Ballesteros, V. dos Santos, G. Mármol, M. Frías, and J. Fiorelli, "Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications," *Cellulose*, vol. 24, no. 5, pp. 2275–2286, May 2017.