UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS DE *APHANDRA NATALIA*
PARA REFUERZO DE MORTEROS CEMENTICIOS DE
EDIFICACIÓN**

TESIS DOCTORAL

CRISTIAN ANDRÉ BALCÁZAR ARCINIEGA
Arquitecto

2020

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN
Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS DE *APHANDRA NATALIA*
PARA REFUERZO DE MORTEROS CEMENTICIOS DE
EDIFICACIÓN**

AUTOR:

D. CRISTIAN ANDRÉ BALCÁZAR ARCINIEGA

Arquitecto

DIRECTORES:

Dr. FRANCISCO HERNANDEZ OLIVARES

Doctor en Ciencias Físicas

Dr. JAVIER PINILLA MELO

Doctor Arquitecto

2020

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ___ de _____ de 20__.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ___ de _____ de 20__, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	IX
DEDICATORIA	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XVII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	7
1.2. HIPÓTESIS	8
1.3. MARCO METODOLÓGICO	9
2. ANÁLISIS DE LOS ANTECEDENTES	13
2.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FIBRAS VEGETALES	13
2.1.1. VARIABILIDAD EN EL CÁLCULO	17
2.1.2. DEFECTOS SOBRE LA SUPERFICIE DE LAS FIBRAS	18
2.1.2.1. LONGITUD DE CALIBRE	19
2.1.2.2. MÓDULO DE WEIBULL	38
2.1.3. DEFECTOS EN LA MICROESTRUCTURA DE LAS FIBRAS.....	40
2.1.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	47
2.1.5. ÍNDICE DE CRISTALINIDAD	49
2.1.6. ÁNGULO MICROFIBILAR	50
2.1.7. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	53
2.2. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTICIA REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES	54

2.2.1.	DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS VEGETALES EN MEDIOS	
	ALCALINOS.....	54
2.2.2.	UNIÓN INTERFACIAL FIBRA- MATRIZ.....	57
2.2.2.1.	MODIFICACIÓN DE LAS FIBRAS	57
2.2.3.	MITIGACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS	
	VEGETALES EN COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTICIA	61
2.2.3.1.	DISMINUCIÓN DE LA ALCALINIDAD DE LA MATRIZ	62
2.2.3.2.	TRATAMIENTOS HIDRÓFUGOS	64
2.2.3.3.	TRATAMIENTOS HÍBRIDOS	66
2.2.4.	DISPERSIÓN DE LAS FIBRAS EN LA MATRIZ.....	67
2.2.5.	ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LA MATRIZ	68
2.2.6.	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA	73
2.2.7.	FABRICACIÓN DEL MATERIAL	75
2.2.8.	APLICACIONES.....	76
2.2.9.	CREDENCIALES AMBIENTALES	80
2.3.	PIASSABA DE <i>APHANDRA NATHALIA</i>	81
2.4.	MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS.....	83
2.4.1.	HUMO DE SÍLICE.....	84
2.4.2.	CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ.....	86
2.4.3.	POLVO FINO DE MORTERO DE CEMENTO RECICLADO	89
2.5.	AGENTES HIDRÓFUGOS	91
2.5.1.	LÁTEX DE CAUCHO NATURAL	91

2.5.2.	ACEITE DE LINAZA	92
3.	PROCESO EXPERIMENTAL.....	93
3.1.	MATERIALES.....	93
3.1.1.	RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL POLVO FINO DE MORTERO RECICLADO CALCINADO	98
3.1.2.	RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ	100
3.2.	TRATAMIENTOS SOBRE LAS FIBRAS NATURALES.....	102
3.2.1.	TRATAMIENTO ALCALINO	102
3.2.2.	COMBINACIONES DE AGENTES HIDRÓFUGOS CON MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS	103
3.3.	ENSAYOS SOBRE LAS FIBRAS PIASSABA DE <i>APHANDRA</i> <i>NATALIA</i>	105
3.3.1.	CONTENIDO DE HUMEDAD.....	105
3.3.2.	ABSORCIÓN DE AGUA.....	107
3.3.3.	DENSIDAD	109
3.3.4.	GROSOR	110
3.3.5.	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.....	111
3.3.6.	DEGRADACIÓN EN MEDIOS ALCALINOS	115
3.3.7.	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.....	117
3.3.8.	MICROSCOPIA SEM	119

3.4. ENSAYOS SOBRE LOS MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS (SCM)	120
3.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA	120
3.4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA.....	121
3.4.3. TAMAÑO DE PARTÍCULA	122
3.4.4. pH DE LA SOLUCIÓN AGUA- CEMENTO Y DE LAS SOLUCIONES AGUA – CEMENTO – SCM.....	124
3.5. GRANULOMETRÍA DEL ÁRIDO USADO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MORTEROS.	126
3.6. PREPARACIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO PORTLAND PARA PRUEBAS DE FLEXIÓN CON FIBRAS ORDENADAS LONGITUDINALMENTE.....	129
3.7. ENSAYOS SOBRE LOS MORTEROS ENDURECIDOS	131
3.7.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	131
3.7.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.....	136
3.7.3. pH DE LA SOLUCIÓN DE POROS.....	138
4. RESULTADOS	140
4.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PIASSABA DE APHANDRA NATALIA	140
4.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD	140
4.1.2. ABSORCIÓN DE AGUA.....	142
4.1.3. DENSIDAD	143

4.1.4.	ENSAYOS A TRACCION	147
4.2.	DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS EN MEDIOS ALCALINOS	154
4.3.	CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS (SCM)	164
4.3.1.	COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	164
4.3.2.	TAMAÑO DE PARTÍCULA	165
4.3.3.	MORFOLOGÍA	166
4.3.4.	EFFECTOS DE LOS SCM SOBRE EL pH DE LA SOLUCIÓN AGUA CEMENTO.....	167
4.4.	MORTEROS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS PIASSABA DE <i>APHANDRA NATALIA</i> CON DIVERSOS TRATAMIENTOS	172
4.4.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	173
4.4.1.1.	TRANSPORTE DE LA HUMEDAD	173
4.4.1.2.	DENSIDAD APARENTE, ABSORCIÓN DE AGUA, Y POROSIDAD ABIERTA.....	183
4.4.2.	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.....	187
4.4.2.1.	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	187
4.4.3.	pH DE LA SOLUCIÓN DE POROS.....	190
5.	DISCUSIÓN	199
5.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE LAS FIBRAS PIASSABA DE <i>APHANDRA NATALIA</i>	199
5.1.1.	GROSOR DE LA FIBRA Y ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....	199

5.1.2.	MICROESTRUCTURA	203
5.1.3.	MORFOLOGÍA DE LA SUPERFICIE Y DEFECTOS.....	215
5.1.4.	TENSIÓN VERSUS DEFORMACIÓN.....	220
5.1.5.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y MÓDULO DE YOUNG	228
5.1.6.	MÓDULO DE WEIBULL DE LAS FIBRAS DE <i>APHANDRA</i> <i>NATALIA</i>	234
5.1.7.	FUNCIÓN DE FORMA	244
5.2.	EFFECTOS DE DIFERENTES TRATAMIENTOS SOBRE LAS FIBRAS PIASSABA (<i>APHANDRA NATALIA</i>) EN MORTEROS DE CEMENTO.....	250
5.2.1.	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS	252
5.2.1.1.	TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO	252
5.2.1.2.	TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM.....	257
5.2.1.3.	TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM.....	259
5.2.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS	260
5.2.2.1.	TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO	260
5.2.2.2.	TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM.....	264
5.2.2.3.	TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM.....	266
5.2.3.	pH DE LA SOLUCIÓN DE POROS VERSUS LA DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS EN MEDIOS ALCALINOS	267
5.2.3.1.	TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO	267
5.2.3.2.	TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM.....	270
5.2.3.3.	TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM.....	271

5.2.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA Y MICROSCOPIA	
ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	274
5.2.4.1. TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO	274
5.2.4.2. TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM.....	278
5.2.4.3. TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM.....	280
6. CONCLUSIONES	282
6.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS DE <i>APHANDRA NATALIA</i>	283
6.2. EFECTOS DEL TRATAMIENTO ALCALINO Y LOS RECUBRIMIENTOS DE LAS FIBRAS EN LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS Y LA DEGRADACIÓN ALCALINA	285
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	288
8. BIBLIOGRAFÍA	291
ÍNDICE DE FIGURAS.....	321
ÍNDICE DE TABLAS	334
ANEXO 1. COMUNICACIÓN EN CONGRESO INTERNACIONAL.....	336
ANEXO 2. ARTÍCULO ACEPTADO EN REVISTA INDEXADA.....	348

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha llegado a su culminación gracias al apoyo incondicional de familiares, amigos, y muy especialmente de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) por sus políticas de estudios de doctorado para sus docentes.

En primer lugar, agradezco a Sofía Sanz González de Lema por brindar en su momento como responsable del Departamento de Arquitectura y Arte todo el apoyo necesario para sobrellevar a la par las actividades de docencia y lo relacionado con la tesis.

A mis directores de tesis Francisco Hernández Olivares y Javier Pinilla Melo por su empatía y generosidad a lo largo de este proceso.

A María del Cisne Guamán por su valiosa ayuda a lo largo del estudio de las fibras, la activación térmica tanto de la ceniza de cáscara de arroz (RHA), como el polvo fino de mortero de cemento calcinado reciclado (BRMF), esto en el laboratorio de Alimentos de la UTPL, además de su colaboración con la consecución de la microscopía electrónica de barrido.

A Eduardo Aguirre por su ayuda en la obtención de BRMF, también por sus valiosas aportaciones en la revisión de los artículos derivados de esta tesis.

A Néstor Balcázar Apolo por su colaboración en la construcción del mecanismo de ensayo a la tracción de las fibras, igualmente por su ayuda en el desarrollo de los morteros de cemento fibrosos investigados.

A los ingenieros Ángel Tapia, Juan Carlos Quintuña, Diego Mata, Renato Gonzales, y Holger Benavides por su ayuda en los laboratorios de Mecánica de Suelos y Geotecnia, y Resistencia de Materiales de la UTPL.

DEDICATORIA

A mis padres Néstor y Linda.

A mi querida y amada esposa María del Cisne.

A mis hermanos Karla y Vinicio.

A mi suegra Carmelina.

A los amigos: Ramiro, Galo, Eduardo, Sofía, Héctor, David, Vanessa y María José.

RESUMEN

Esta tesis en correspondencia con el uso de recursos naturales renovables para reducir el efecto perjudicial de los materiales sintéticos en el medio ambiente encontró el desafío en estudiar una fibra poco común como la de *Aphandra natalia*. Además, convertir los subproductos de los desechos agrícolas como las cenizas de cáscara de arroz (RHA¹), y los subproductos de los desechos de la construcción como el polvo fino de mortero de cemento calcinado reciclado (BRMF²), en productos de utilidad para morteros cementicios de edificación. Se abordaron las propiedades físicas, mecánicas y de microestructura de las fibras, su durabilidad en medios alcalinos, y su desempeño en morteros de cemento, sin tratar, con tratamiento alcalino, y con una capa de recubrimiento de agentes hidrófugos y materiales cementantes suplementarios (SCM³).

En primer lugar, las fibras se clasificaron por su grosor⁴ en seis rangos de frecuencias relativas, después fueron ensayadas a tracción, y examinadas mediante microscopía electrónica, y microscopía electrónica de barrido (SEM⁵). Se utilizó el módulo de Weibull para cuantificar el grado de variabilidad de la resistencia a la tracción, módulo de Young, y deformación de rotura en relación a los defectos sobre la superficie y la microestructura de las fibras. Los estudios fueron complementados con los análisis de densidad, absorción de agua, y contenido de humedad. Se reconocieron fibras con su

¹ Abreviatura del término en inglés “Rice Husk Ash”.

² Abreviatura del término en inglés “Burned Recycled Mortar Powder Fines”.

³ Abreviatura del término en inglés “Supplementary Cementing Materials”.

⁴ Dimensión más pequeña de la sección transversal de la fibra.

⁵ Abreviatura del término en inglés “Scanning Electron Microscopy”.

microestructura completa y fibras fragmentadas o separadas. Se detectó en las fibras con su microestructura completa, que la médula y los defectos que conlleva su presencia sobre la superficie aumenta la probabilidad de falla a una tensión inferior que las fibras con microestructura fragmentada. También se encontró una relación inversamente proporcional entre los valores de la media de la resistencia a la tracción y la media del módulo de Young obtenidos del análisis estadístico Weibull, y la media aritmética del grosor y el área de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción en relación a los seis rangos de frecuencia. Los valores más altos de resistencia a la tracción y módulo de Young corresponden a las fibras más finas, sin embargo, los valores más altos de deformación de rotura corresponden a las fibras más gruesas.

En segundo lugar, se caracterizaron los SCM: RHA, BRMF, y humo de sílice (SF⁶). Se analizaron sus propiedades químicas a través de la técnica de espectroscopia de fluorescencia de rayos X (FRX⁷), se determinó la distribución del tamaño de partícula por tamizado, se observó la morfología de las partículas a través de microscopía óptica, y se analizó la efectividad puzolánica como sustituto de cemento a través de la medición del pH de soluciones de agua- cemento, y soluciones agua – cemento – SCM. Los tres SCM disminuyeron la alcalinidad del cemento, sin embargo, RHA y SF por su composición química rica en sílice y una mejor calidad de partícula mostraron mejores resultados que BRMF.

⁶ Abreviatura del término en inglés “Silica Fume”.

⁷ Abreviatura del término en inglés “X-Ray Fluorescence”.

Finalmente, se determinaron los valores de las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad abierta, coeficiente de absorción de agua por inmersión, y capilaridad), y mecánicas (resistencia a la flexión y módulo de elasticidad) de los morteros endurecidos con fibras sin tratar, con fibras tratadas con hidróxido de calcio, y con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural (NRL⁸) - SCM, y aceite de linaza (LO⁹) - SCM. Después de los ensayos de resistencia a la flexión las probetas de mortero fibroso fueron divididas en dos partes, las fibras expuestas en el punto de fractura fueron separadas del hormigón y observadas mediante microscopia electrónica, mientras que una de las partes de las probetas fue usada para determinar las propiedades físicas, la otra fue triturada para obtener el valor del pH de la solución de poros. A la par, se estudió la durabilidad de las fibras en un medio alcalino. Las fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y recubiertas con una capa de NRL - SCM, y LO - SCM fueron sumergidas en una solución de hidróxido de sodio por 98 días pesándolas cada 7 días. Tanto los ensayos de capilaridad, pH de la solución de poros de los morteros triturados, y de durabilidad de las fibras en medios alcalinas se realizaron con el propósito de predecir con ayuda de artículos científicos la durabilidad de los morteros fibrosos investigados. Los resultados mostraron, primero, que el recubrimiento de las fibras con una capa de NRL- SCM mejoró la resistencia a la flexión de los morteros endurecidos a 28 días de curado, también disminuyó la degradación de las fibras en medios alcalinos en relación a las fibras sin tratar, a las fibras tratadas con hidróxido de calcio, y a las fibras recubiertas con una capa de LO - SCM; segundo, NRL presentó mayor compatibilidad con los SCM que LO; tercero, NRL fue mejor impermeabilizante para las fibras que LO; cuarto, las RHA presentaron mayor compatibilidad con el polímero

⁸ Abreviatura del término en inglés “Natural Rubber Latex”.

⁹ Abreviatura del término en inglés “Linseed Oil”.

y el aceite que SF o BRMF; finalmente, el efecto combinado NRL - BRMF mejoró la resistencia a la flexión de los morteros de 28 días de curado, sin embargo después de ese tiempo el incremento de pH de las solución de poros de los morteros triturados en relación a los morteros sin fibras señaló que el efecto puzolánico de BRMF no fue sostenible. Esto guardó correspondencia con los valores del ensayo de la durabilidad de las fibras en un medio alcalino, las fibras recubiertas con una capa de NRL - BRMF presentaron menor pérdida de masa a los 28 días, pero a los 98 días los valores fueron más altos incluso que las fibras sin tratar. Estas observaciones pueden traducirse en un mortero fibroso (NRL-BRMF) con menor durabilidad ante la humedad del agua que los morteros sin fibras, que los morteros con fibras sin tratar, y que los morteros con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

ABSTRACT

This thesis in correspondence with the use of renewable natural resources to reduce the detrimental effect of synthetic materials on the environment found the challenge in studying a rare fiber such as that of *Aphandra Natalia*. In addition, converting agricultural waste by-products such as Rice Husk Ash (RHA), and construction waste by-products such as Burned Recycled Mortar Powder Fines (BRMF) dust, into utility products for cementitious mortar from edification. The physical, mechanical and microstructure properties of the fibers, their durability in alkaline media, and their performance in cement mortars, untreated, with alkaline treatment, and with a coating layer of water-repellent agents and Supplementary Cementing Materials (SCM) were addressed.

First, the fibers were classified by their thickness in six ranges of relative frequencies, then they were tensile tested, and examined by electron microscopy, and Scanning Electron Microscopy (SEM). The Weibull modulus was used to quantify the degree of variability of the tensile strength, Young's modulus, and breaking strain in relation to the defects on the surface and the microstructure of the fibers. The studies were complemented with the analysis of density, water absorption, and moisture content. Fibers with their complete microstructure and fragmented or separated fibers were recognized. In the fibers with their complete microstructure it was detected that the medulla and the defects that its presence entails on the surface increases the probability of failure at a lower tension than the fibers with fragmented microstructure. An inversely proportional relationship was also found between the mean values of the tensile strength and the mean Young's modulus obtained from the Weibull statistical

analysis, and the arithmetic mean of the thickness and the cross-sectional area in the fracture plane of the fibers tested in tension in relation to the six frequency ranges. The highest values of tensile strength and Young's modulus correspond to the finest fibers; however, the highest values of breaking strain correspond to the thickest fibers.

Second, SCMs: RHA, BRMF, and silica fume (SF) were characterized. Its chemical properties were analyzed through the X-ray fluorescence (XRF), the particle size distribution was determined by sieving, the morphology of the particles was observed through optical microscopy, and the pozzolanic effectiveness as a cement substitute was analyzed by measuring the pH of water-cement solutions and water-cement-SCM solutions. The three SCMs decreased the alkalinity of the cement, however, RHA and SF due to their chemical composition rich in silica and better particle quality showed better results than BRMF.

Finally, the values of the physical properties (apparent density, open porosity, coefficient of absorption of water by immersion, and capillarity), and mechanical (flexural strength and modulus of elasticity) of the hardened mortars with untreated fibers were determined. With fibers treated with calcium hydroxide, and with fibers coated with a layer of Natural Rubber Latex (NRL) - SCM, and Linseed Oil (LO) - SCM. After the flexural strength tests, the fibrous mortar specimens were divided into two parts, the fibers exposed at the fracture point were separated from the concrete and observed by electron microscopy, while one of the parts of the specimens was used to determine the physical properties, the other was crushed to obtain the pH value of the pore solution. At the same time, the durability of the fibers in an alkaline environment was studied. The untreated fibers, treated with calcium hydroxide, and covered with a

layer of NRL-SCM, and LO-SCM were immersed in a sodium hydroxide solution for 98 days, weighing them every 7 days. Both the capillary tests, the pH of the pore solution of the crushed mortars, and the durability of the fibers in alkaline media were carried out with the purpose of predicting, with the help of scientific articles, the durability of the fibrous mortars investigated. The results showed; first, that the coating of the fibers with a layer of NRL-SCM improved the flexural strength of the hardened mortars at 28 days of curing, it also decreased the degradation of the fibers in alkaline media in relation to the fibers untreated, to fibers treated with calcium hydroxide, and to fibers coated with a layer of LO – SCM; second, NRL presented greater compatibility with SCMs than LO; third, NRL was better waterproofing for the fibers than LO; fourth, RHAs showed greater compatibility with the polymer and oil than SF or BRMF; finally, the combined NRL - BRMF effect improved the flexural strength of the mortars after 28 days of curing. However, after that time, the increase in pH of the pore solution of the crushed mortars in relation to the mortars without fibers indicated that the pozzolanic effect of BRMF was not sustainable. This corresponded to the values of the fiber durability test in an alkaline medium, the fibers coated with a layer of NRL-BRMF presented less mass loss at 28 days, but at 98 days, the values were even higher than untreated fibers. This can translate into a fibred mortar with less durability in the face of water humidity than mortars without fibers and mortars with untreated fibers and treated with calcium hydroxide. These observations can be translated into a fibrous mortar (NRL-BRMF) with less durability in the face of water humidity than mortars without fibers, than mortars with untreated fibers, and than mortars with fibers treated with calcium hydroxide.

1. INTRODUCCIÓN

Las fibras naturales presentan gran potencial como sustituto de materiales no renovables en muchas aplicaciones, desde una perspectiva de desarrollo económico y de sostenibilidad los compuestos reforzados con estas fibras brindan la oportunidad de desarrollar una silvicultura y economía basada en la agricultura especialmente la del sector no alimentario (Djafari Petroudy 2017). Los factores más importantes para su selección son el origen que pueden cultivarse adecuadamente en muchos países, y su disponibilidad que pueden cosecharse en períodos cortos (Pickering, Efendy, and Le 2016). Las fuentes más adecuadas de fibras vegetales para ser utilizadas en materiales compuestos son los desechos agrícolas y las plantas que se cultivan intencionalmente para la extracción de sus fibras (Sarasini and Fiore 2018).

Las fibras piassaba son consideradas un recurso forestal no maderero, provienen de tres especies de palma: *Aphandra natalia*, *Attalea funifera* Mart, y *Leopoldinia piassaba* Wallace. *Aphandra natalia* es una palma nativa del Amazonas occidental se la puede encontrar desde las estribaciones de los Andes de Ecuador, la parte norte de la Amazonía peruana, hasta el estado de Acre en Brasil (Figura 1). Las fibras piassaba de *Aphandra natalia* cosechadas de la vaina foliar y el pecíolo representan un recurso de gran importancia económica para la industria de las escobas de Ecuador, Perú, y Brasil. La sostenibilidad de la obtención de sus fibras depende de los métodos de cosecha desarrolladas en cada región geográfica, en Ecuador y en algunas partes de Perú la extracción es sostenible, pero en Brasil y en otras partes de Perú los métodos son destructivos (Kronborg et al. 2008; Balslev et al. 2010; Boll et al. 2005; Pedersen 1996).

Figura 1. Mapa de distribución de las tres especies de piassaba en América del Sur.

Fuente de la figura: (Kronborg et al. 2008)

Las fibras de *Attalea funifera* Mart y *Leopoldinia piassaba* Wallace han sido estudiadas desde varias perspectivas: (1) (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006) reportaron las propiedades mecánicas en función de diferentes longitudes de calibre y presentaron la morfología de la superficie de las fibras de *Attalea funifera*; (2) (Elzubair et al. 2007) reportaron las características mecánicas en función de dos rangos de diámetros, las propiedades térmicas, la morfología de la superficie, y la sección transversal de las fibras de *Leopoldinia piassaba* y *Attalea funifera*; (3) (Alves Fidelis et al. 2013) correlacionaron la morfología de varias fibras vegetales entre ellas las fibras de *Attalea funifera* con sus propiedades mecánicas a través del análisis de imágenes, calcularon las áreas de las secciones transversales de las fibras utilizando imágenes obtenidas en un microscopio electrónico de barrido, y utilizaron el análisis estadístico de Weibull para cuantificar la variabilidad de la resistencia de la fibra; y (Miranda et al. 2015) reportaron el efecto del lavado y de diferentes tratamientos como el de hidróxido de sodio, ácido acético glacial, ácido anhídrido acético, y ácido sulfúrico en las propiedades mecánicas de las fibras de *Attalea funifera*.

Las fibras de *Attalea funifera* son las más estudiadas y experimentadas en materiales de construcción que las fibras de las otras dos palmas, se han experimentado en compuestos de matriz epoxi (Nascimento et al. 2012), en morteros poliméricos (Reis and Carneiro 2013), en compuestos de cemento mezcladas con fibras de vidrio (Santos et al. 2016), en compuestos de matriz de poliéster (de Oliveira Filho et al. 2018), entre otros.

Sin embargo, las fibras de *Aphandra natalia* no han sido estudiadas desde ninguna perspectiva, siendo necesario investigar aspectos como las características físicas y

mecánicas, la morfología de la superficie, la microestructura de la sección transversal, la variabilidad de la resistencia, además de experimentarlas en materiales de construcción.

Los materiales tradicionalmente empleados como refuerzos en materiales de matriz de cemento Portland como el acero, las fibras de vidrio, y las fibras de carbono son recursos no renovables con alto consumo de energía durante su proceso de fabricación. Las fibras naturales presentan varias ventajas sobre las fibras sintéticas y el acero de refuerzo entre ellas su abundancia, la biodegradabilidad, lo reciclables, su fácil manejo, la no toxicidad, la baja densidad, la no abrasividad, las buenas propiedades térmicas, las buenas propiedades de tenacidad, y los buenos valores de módulo de Young, sin embargo presentan alta capacidad de absorción de agua y escasa compatibilidad con la matriz, sus consecuencias sobre las propiedades del material compuesto son poco predecibles (Kılınç, Durmuşkahya, and Seydibeyoğlu 2017; Abiola 2017).

Los compuestos de cemento reforzados con fibras naturales a medida en que envejecen sufren pérdidas significativas en su desempeño mecánico (Barra et al. 2015), esto ocurre por la alta capacidad de absorción de agua de las fibras durante la etapa de curado responsable de los cambios de volumen y las pérdidas de adhesión fibra – matriz (Huu et al. 2011), y por el deterioro de las fibras en la matriz de cemento ocasionado por la hidrólisis alcalina de la lignina y la hemicelulosa, y la precipitación de los productos de hidratación del cemento sobre las paredes celulares de las fibras (Toledo Filho et al. 2000; Rocha et al. 2017), a medida que avanza la degradación el silicato cálcico hidratado (CSH) y la portlandita (CH) se infiltran gradualmente en las paredes celulares ocasionando mineralización y fragilización de las fibras (Wei and Meyer 2015).

Varios estudios se han desarrollado con el objetivo de restringir la degradación de las fibras naturales en medios alcalinos, a continuación se los resume en cuatro grupos: (1) disminución de la alcalinidad del material compuesto sustituyendo parcialmente el cemento Portland por puzolanas (Wei and Meyer 2015) o combinando cemento con materiales ricos en sílice y minerales de arcilla (Wei and Meyer 2017, 2016); (2) modificación de las fibras a través de diferentes técnicas como la polimerización con plasma frío de metano (Barra et al. 2015), tratamientos alcalinos con hidróxido de calcio (Ridzuan et al. 2015) o hidróxido de sodio (Li, Zhou, and Guo 2017), hornificación¹⁰ (Claramunt et al. 2011), o tratamiento hidrotérmico¹¹ (Sawsen et al. 2015); (3) tratamientos hidrófugos con aceite de linaza (Abdullah and Lee 2017; Basta, Sefain, and El-Rewainy 2011); y (4) tratamientos híbridos o combinaciones, por ejemplo: impermeabilizante – puzolanas (Jose et al. 2017), o hornificación – impregnación polimérica (Ferreira et al. 2015).

El tratamiento alcalino con hidróxido de calcio es considerado el más viable económicamente (Das and Chakraborty 2006); efectivo para mejorar la compatibilidad entre la fibra vegetal y la matriz de cemento, ecoeficiente, no contaminante y sostenible (Hernández-Olivares et al. 2020). Por su parte las fibras tratadas con aceite de linaza en materiales de matriz de cemento a 28 días incrementan la resistencia y disminuyen la absorción de agua del material compuesto (Abdullah and Lee 2017), aunque aún queda pendiente estudiar la durabilidad del material y el de las fibras en la matriz a mayor tiempo de exposición al agua. A diferencia de los tratamientos anteriores las fibras

¹⁰ Consiste en someter a las fibras a una secuencia de ciclos de secado y rehumectación.

¹¹ Consiste en limpiar las fibras con agua hirviendo durante cinco minutos.

recubiertas con látex natural – puzolanas reducen la alcalinidad de la pasta de cemento y mejoran el rendimiento y la durabilidad de los materiales compuestos a base de cemento (Jose et al. 2017).

En complemento, el desarrollo sostenible de la construcción persigue reducir la extracción y el uso de materiales convencionales a través de recursos naturales renovables provenientes de residuos y subproductos que puedan reciclarse. Por un lado, de todos los residuos de plantas las RHA quemadas entre 500°C y 700°C son reactivas en condiciones alcalinas como las de la pasta de cemento (Nair et al. 2008). Por otro lado, la búsqueda de nuevas opciones para aprovechar residuos procedentes de la construcción ha conducido a analizar el potencial de los áridos finos reciclados, un caso especial es BRMF (Aguirre-Maldonado and Hernández-Olivares 2017) una materia prima rica en óxido de sílice, sin embargo existen pocas investigaciones que puedan ayudar a utilizar BRMF en la práctica.

De lo expuesto, en consideración con el uso de recursos naturales renovables para reducir el efecto perjudicial de los materiales sintéticos al medio ambiente, y al desarrollo de materiales compuestos de matriz cementicia con fibras vegetales de mayor resistencia y durabilidad, se encontró el desafío de estudiar una fibra poco común como lo es piassaba de *Aphandra natalia*, y convertir los subproductos de los desechos agrícolas como las RHA y los subproductos de los desechos de la construcción como el BRMF en productos de utilidad para morteros cementicios de edificación.

1.1. OBJETIVOS

La presente tesis aborda dos objetivos, el primero consiste en estudiar una fibra poco común como lo es piassaba de *Aphandra natalia*, y el segundo consiste en obtener con estas fibras un mortero fibroso de mayor resistencia a la flexión a los 28 días que los morteros sin fibras, y de mayor durabilidad ante la exposición a la humedad del agua que los morteros reforzados con fibras sin tratar.

Estos objetivos implican investigar las propiedades físicas y mecánicas de las fibras, la morfología de la superficie y la microestructura de las fibras, su durabilidad en medios alcalinos, y su desempeño en morteros endurecidos con fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y recubiertas con una capa de NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF), y LO – SCM (RHA, SF, y BRMF).

También conllevan caracterizar los SCM (RHA, SF, y BRMF): analizar sus propiedades químicas, determinar la distribución del tamaño de partícula, observar la morfología de las partículas, y analizar la efectividad puzolánica como sustituto de cemento a través de la medición del pH de soluciones de agua – cemento, y soluciones de agua – cemento – SCM.

1.2. HIPÓTESIS

Se busca obtener un mortero con fibras de *Aphandra natalia* que a los 28 días de curado presente valores más altos de resistencia a la flexión y módulo de Young, y valores más bajos de velocidad de ascensión capilar que los morteros sin fibras, además que las fibras muestren el menor daño y la menor cantidad de compuestos de hidróxido de calcio sobre sus superficies en relación a las fibras sin tratar y tratadas alcalinamente. También se espera que después de ese tiempo se mantengan valores reducidos de pH de la solución de poros en comparación a los morteros convencionales, y que exista una reducción de los valores de pérdida de masa de las fibras en relación a las fibras sin tratar y tratadas alcalinamente.

Para esto se requiere impermeabilizar las fibras, disminuir la alcalinidad y la cantidad de vacíos especialmente los mesoporos¹² de la matriz de cemento. El látex natural y el aceite de linaza son buenos agentes hidrófugos para las fibras y buenos adherentes para los SCM (RHA, SF, y BRMF), por su parte los SCM son capaces de disminuir la alcalinidad de la matriz de cemento de forma sostenible y ocupar efectivamente los mesoporos, finalmente la capa de recubrimiento formada por la interacción de la película de NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF), y LO – SCM (RHA, SF, y BRMF) pueden mejorar la resistencia a la flexión y la durabilidad ante la humedad del agua de los morteros de cemento fibrosos.

¹² Los mesoporos ($2\text{ nm} < \varphi < 50\text{ nm}$) determinan en mayor medida el comportamiento frente a la durabilidad por su mayor conexión (Núñez, Terrades, and Cánovas 2008).

1.3. MARCO METODOLÓGICO

La tesis consta de dos secciones de trabajo, la primera parte corresponde a un estudio documental de los antecedentes a partir de artículos consultados en las principales bases de datos científicas, y la segunda parte es de tipo experimental.

Se inició con el estudio de las fibras de *Aphandra natalia* sin tratar, fueron ensayadas a tracción, también se estudiaron las propiedades físicas de densidad, contenido de humedad, y absorción de agua, además se observó la morfología de la superficie y la microestructura de la sección transversal a través de microscopía electrónica y microscopia de barrido SEM.

A la par se analizaron las RHA, el BRMF, y el SF a través de la composición química medida mediante la técnica de FRX, el pH de soluciones de agua – cemento y soluciones de agua – cemento – SCM (RHA, BRMF, y SF), la distribución del tamaño de partícula por tamizado, y el estudio de la morfología por microscopia óptica.

También se estudió la durabilidad de las fibras en un medio alcalino. Se midió la pérdida de masa de fibras sin tratar, con fibras tratadas con hidróxido de calcio, y con fibras recubiertas con LRM – SCM (RHA, BRMF, y SF), y LO – SCM (RHA, BRMF, y SF) en una solución de hidróxido de sodio.

Después se elaboraron probetas de morteros de cemento Portland de 40 mm x 40 mm x 160 mm con fibras sin tratar, con fibras tratadas con hidróxido de calcio, y con fibras recubiertas con LRM – SCM (RHA, BRMF, y SF), y LO – SCM (RHA, BRMF, y SF).

Con el propósito de evitar la pérdida de los recubrimientos durante la mezcla de la pasta cementicia las fibras se ordenaron longitudinalmente una a una y por capas.

Seguidamente se desarrollaron los ensayos de los morteros endurecidos de resistencia a la flexión, una vez ensayadas las probetas fueron divididas en dos partes, las fibras expuestas en el punto de fractura fueron separadas del hormigón y observadas mediante microscopia óptica, mientras que una de las partes de las probetas fue usada para determinar las propiedades físicas, la otra fue triturada para obtener el valor del pH de la solución de poros.

Los resultados obtenidos en laboratorio fueron procesados con softwares estadísticos, para el estudio de las fibras se empleó “Statgraphics Centurion” y “Minitab”, y durante las pruebas a flexión de los morteros endurecidos “TRAPEZIUM X”.

En complemento, las instalaciones y actividades en las que se desarrollaron los estudios antes mencionados se detallan a continuación:

En el taller de Construcciones de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) se desarrollaron las siguientes actividades:

- Construcción del mecanismo de ensayos a tracción de las fibras.
- Los ensayos a tracción de las fibras.
- Elaboración de las probetas de morteros fibrosos
- Microscopia electrónica de la sección transversal y la superficie de las fibras extraídas de las probetas ensayadas a tracción.

- Microscopía óptica de la morfología de las partículas de las RHA, el BRMF, y el SF.
- Estudio de las propiedades físicas de los morteros sin fibras, con fibras sin tratar, con fibras recubiertas con LRM – SCM (RHA, BRMF, y SF), y LO – SCM (RHA, BRMF, y SF).

En el laboratorio de Resistencia de Materiales de la UTPL se realizaron las siguientes actividades:

- Distribución del tamaño de partícula por tamizado de los áridos.
- Ensayos a la flexión de los morteros endurecidos sin fibras, con fibras sin tratar, con fibras recubiertas con LRM – SCM (RHA, BRMF, y SF), y LO – SCM (RHA, BRMF, y SF).

En el laboratorio de Alimentos de la UTPL se determinaron las siguientes actividades:

- Determinación de propiedades físicas de las fibras de densidad, contenido de humedad, y absorción de agua.
- Activación térmica de las RHA y el BRMF.

En el laboratorio de Mecánica de Suelos y Geotecnia de la UTPL se desarrollaron las siguientes actividades:

- Trituración mecánica y trituración con pulverizador de los desechos de mortero para pegar ladrillos.

- Determinación de la composición de óxidos del cemento, las RHA, el BRMF, y el SF a través de la técnica de FRX.
- Distribución del tamaño de partícula por tamizado de las RHA, el BRMF, y el SF.
- Estudio de la efectividad puzolánica de las RHA, el BRMF, y el SF como sustituto de cemento a través de la medición del pH de soluciones de agua – cemento, y soluciones de agua – cemento – SCM (RHA, BRMF, y SF).
- Estudio del pH de la solución de poros de los morteros triturados mecánicamente sin tratar, con fibras tratados alcalinamente, con fibras recubiertas con LRM – SCM (RHA, BRMF, y SF), y LO – SCM (RHA, BRMF, y SF).
- Durabilidad de las fibras en una solución de hidróxido de sodio a través de la pérdida de masa.

Por último, en la División de Microscopía Electrónica de los Servicios Centrales de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Cádiz se realizaron los ensayos de Microscopía de Barrido SEM.

2. ANÁLISIS DE LOS ANTECEDENTES

2.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FIBRAS VEGETALES

En la Tabla 1 se muestran las características mecánicas de varias fibras vegetales estudiadas por varios autores con similares longitudes de calibre y similares áreas de la sección transversal en el plano de fractura. A partir de estos valores se plantea una clasificación en relación al rendimiento de las fibras, se confrontan la resistencia a la tracción versus el módulo de Young (Figura 2), y la resistencia a la tracción versus la deformación de rotura (Figura 3). Se las clasifica en tres grupos: (1) fibras de alto rendimiento o de resistencias superiores a 750 MPa, módulos de Young superiores a 50 GPa, y deformaciones inferiores al 7.5 %; (2) fibras de resistencia característica entre 250 MPa a 750 MPa, y módulos de Young y deformaciones fluctuantes; y, (3) fibras de bajo rendimiento con resistencias inferiores a 250 MPa, módulos de Young inferiores a 10 GPa, y deformaciones de rotura superiores al 7.5%. Las fibras piassaba tanto de *Aphandra natalia* y *Attalea funifera* pueden ser consideradas de bajo rendimiento, sin embargo, esta clasificación no implica limitar sus usos en materiales compuestos a base de cemento, puesto que el factor más importante a considerar es la durabilidad de las fibras en la matriz. La dispersión de los valores de las propiedades mecánicas de las fibras vegetales son ocasionadas por los diferentes métodos empleados para calcular el área de la sección transversal en el plano de fractura, por la precisión de los instrumentos de medición y el ajuste de las mordazas, y por las características propias de las fibras como la variabilidad de la sección a lo largo de su volumen, el ángulo microfibrilar, las dimensiones celulares, los defectos sobre la superficie y la microestructura, y la diferentes composiciones químicas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las fibras vegetales.

Fibras	Longitud de calibre (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformación de rotura (%)	Área (mm)	Referencias
Tallo de <i>Cissus quadrangularis</i>	20	2823	59	5.5	0.466	(Indran and Raj 2015)
Raiz de <i>Cissus quadrangularis</i>	20	2817	93	4.3	0.334	(Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014)
Banana	25	600	17.9	3.4	0.359	(Rao and Rao 2007)
Bambú	25	503	35.9	1.4	0.429	(Rao and Rao 2007)
Palma Datilera	25	459	1.9	24	0.410	(Rao and Rao 2007)
Sisal	25	567	10.4	5.5	0.314	(Rao and Rao 2007)
Palma Datilera	25	309	11.3	2.7	0.410	(Rao and Rao 2007)
Cáscara de Coco	25	500	2.5	20	0.365	(Rao and Rao 2007)
Piassaba de <i>Attalea funifera</i>	40	131	3.8	11.4	0.585	(Alves Fidelis et al. 2013)
Piassaba de <i>Aphandra natalia</i>	20	107	4	9.5	0.411	La presente investigación

Figura 2. Resistencia a la tracción versus el módulo de Young de las fibras del tallo de *Cissus quadrangularis* (T_CQ), de las fibras de la raíz de *Cissus quadrangularis* (R_CQ), de las fibras del sisal (FS), de fibras de la banana (FBN), de las fibras del bambú (FB), de las fibras de la palma datilera (FPD), de las fibras de la cáscara de coco (FCC), de las fibras piassaba de *Attalea funifera* (P_AF), y de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* (P_AN).

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 1](#))

Figura 3. Resistencia a la tracción versus deformación de rotura de las fibras del tallo de *Cissus quadrangularis* (T_CQ), de las fibras de la raíz de *Cissus quadrangularis* (R_CQ), de las fibras del sisal (FS), de fibras de la banana (FBN), de las fibras del bambú (FB), de las fibras de la palma datilera (FPD), de las fibras de la cáscara de coco (FCC), de las fibras piassaba de *Attalea funifera* (P_AF), y de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* (P_AN).

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 1](#))

2.1.1. VARIABILIDAD EN EL CÁLCULO

La variabilidad de los valores de las propiedades mecánicas de las fibras vegetales puede deberse a cuatro factores: (1) ignorar la presencia del lumen en el centro de la fibra, (2) las condiciones de la prueba, (3) las características de la planta, y (4) la forma como se mide la sección transversal de la fibra.

(Baley 2002) al experimentar con fibras de lino destacó que al aumentar el tamaño del lumen, la sección transversal real de la fibra disminuye y esto causa una subestimación del módulo de Young, además destacó que la dependencia del módulo de Young con el diámetro de la fibras está relacionada con ignorar la presencia del lumen en el centro de la fibra, también sugirió como otras causas de la variabilidad de los valores de las propiedades mecánicas a la sección transversal no constante a lo largo de la longitud de la fibra, la presencia de defectos, y la variabilidad de la composición química de una fibra a otro.

Por su parte (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008) relacionaron la variabilidad de las propiedades mecánicas de las fibras de sisal con tres factores principales: (1) las condiciones de prueba asociados a la precisión de la instrumentación, la longitud de calibre, la velocidad de deformación, el tipo de agarres y cumplimiento de la máquina; (2) las características de la planta como la fuente, la edad y el tipo de procesamiento o mecanismo de extracción de las fibras, y la microestructura; y (3) a la medición del área de la sección transversal de las fibras, al suponer que presentan sección circular cuando en realidad presentan una sección transversal irregular, por lo que recomiendan el uso de microscopía SEM para realizar las mediciones correspondientes.

Es necesario mencionar que muchas veces el lumen no se tiene en cuenta por las dificultades para determinar sus dimensiones (Bodros and Baley 2008), y en otras ocasiones porque se considera que las variaciones de diámetro del lumen no son considerables (K. Charlet et al. 2009).

2.1.2. DEFECTOS SOBRE LA SUPERFICIE DE LAS FIBRAS

Los materiales frágiles como las fibras presentan defectos distribuidos al azar sobre sus superficies o en su microestructura, estos defectos generan la dispersión de los valores de resistencia, cuando se carga una fibra el enlace o el segmento que contiene el defecto más largo fallará primero y causará la fractura de la fibra, cuanto más larga sea la fibra mayor será la probabilidad de que un enlace tenga un tamaño de falla crítico requerido para la falla, aunque generalmente se esperaría que la resistencia media de una fibra de longitud corta sea mayor que la resistencia media de una fibra de longitud larga, lo que ocurrirá es que la fibra fallará cuando falle el enlace más débil, esta teoría es conocida como la suposición del enlace más débil (K. K. Chawla 1993). Los defectos se producen irreversiblemente durante el crecimiento de la planta o durante el proceso de extracción, una fibra puede contener un punto lo suficientemente débil como para permitir la falla sin parecer dañada (Davies and Bruce 1998). Por ejemplo, durante el proceso de separación de las fibras de lino se inducen bandas retorcidas que contienen grietas unidas por microfibrillas sobre las superficies de las fibras que afectan su resistencia (Bos, Van Den Oever, and Peters 2002). La distribución de los defectos sobre la superficie de las fibras se estudia a través del ensayo a la tracción a diferentes longitudes de calibre y se cuantifican a través del módulo de Weibull.

2.1.2.1. LONGITUD DE CALIBRE

Durante el ensayo a la tracción de las fibras a diferentes longitudes de calibre se esperaría que la resistencia media de una fibra de longitud corta sea mayor que la resistencia media de una fibra de longitud larga, sin embargo, puede ocurrir que las fibras incrementen su resistencia (Figuras 4, 6, y 7), o que sus valores fluctúen sin una tendencia clara (Figuras 5, 8, y 9). En cambio con el módulo de Young y la deformación de rotura existe una mayor posibilidad que al incrementar la longitud de calibre, incrementen los valores de módulo de Young (Figuras 12, 13, 14, y 15), y deformación de rotura (Figuras 16, 17, 20, y 21). Los impredecibles resultados de la longitud de calibre sobre las propiedades mecánicas de las fibras son ocasionados por los defectos naturales y los defectos inducidos durante la extracción y procesamiento de las fibras, sin embargo, estas tendencias por si solas no nos permiten identificar el origen ni su distribución sobre sus superficies o en su microestructura, esto puede ser precisado y cuantificado por el módulo de Weibull.

Figura 4. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Sisal (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 5. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Yute (Alves Fidelis et al. 2013).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 6. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Raíz de *Cissus quadrangularis* (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 7. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Tallo de *Cissus quadrangularis* (Indran and Raj 2015).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 8. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de *Coccinia grandis* (Jebadurai et al. 2019).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 9. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de *Attalea funifera* (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 10. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Sisal (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 11. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Yute (Alves Fidelis et al. 2013).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 12. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Raíz de *Cissus quadrangularis* (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 13. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Tallo de *Cissus quadrangularis* (Indran and Raj 2015).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 14. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de *Coccinia grandis* (Jebadurai et al. 2019).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 15. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de *Attalea funifera* (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 16. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Sisal (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 17. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Yute (Alves Fidelis et al. 2013).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 18. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Raíz de *Cissus quadrangularis* (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 19. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Tallo de *Cissus quadrangularis* (Indran and Raj 2015).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 20. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de *Coccinia grandis* (Jebadurai et al. 2019).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 21. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de *Attalea funifera* (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006).

(Figura elaborada por el autor)

2.1.2.2. MÓDULO DE WEIBULL

La variación de la resistencia de una fibra a otra, y la distribución de los tamaños de los defectos a lo largo de cada fibra dependen de la longitud sobre la que se mide, cuando se mide la resistencia de un gran número de fibras sobre una longitud de calibre de prueba, la distribución de las resistencias se puede representar mediante la función de distribución de Weibull (Marshall 1983).

Las estadísticas de Weibull se basan en la "hipótesis del eslabón más débil", es decir que el defecto más grave en la muestra controlará la fuerza, este no es necesariamente el más grande por su gravedad sino que depende de dónde se encuentre, el defecto sujeto al factor de intensidad de tensión más alto será el que controle de la fuerza (Bergman 1984).

La mayoría de las fibras son quebradizas, soportan muy poca deformación plástica, y generalmente la tensión a la que fallan depende de la presencia de defectos, altas resistencia de las fibras se atribuye a la ausencia de grandes defectos, aunque siempre se esperará una población de defectos a lo largo de la longitud de las fibras; el módulo de Weibull es un parámetro importante para caracterizar la distribución de resistencia exhibida por la fibra, si el valor del módulo es grande ($m > 20$) las tensiones incluso ligeramente por debajo del valor de normalización llevarían a una baja probabilidad de falla, mientras que si estuvieran ligeramente por encima, entonces se predeciría la probabilidad, por lo contrario, un módulo de Weibull bajo ($m < 10$) representaría una incertidumbre considerable sobre el nivel de tensión en el que es probable que falle una muestra determinada (Clyne and Hull 2019).

El tamaño del defecto en promedio más pequeño, y la distribución más estrecha de los defectos son responsables de los valores más altos de la resistencia a la tracción y del módulo Weibull (N. Chawla, Kerr, and Chawla 2005). El aumento de la longitud de calibre resulta en una disminución del módulo de Weibull, el tamaño medio del defecto para todos los materiales controla la resistencia media, pero el número de defectos lo controla el módulo de Weibull, mientras que las fibras con una longitud de calibre más baja tienen un número menor de defectos, el tamaño del defecto promedio es el mismo que el de las otras longitudes de calibre (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).

Según el análisis de Weibull la probabilidad de supervivencia de una fibra a un esfuerzo “ σ ” viene dada por la siguiente relación:

$$P(\sigma) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde “ σ ” es la resistencia de la fibra para una determinada probabilidad de supervivencia y “ m ” es el módulo de Weibull.

“ σ_0 ” se define como la fuerza característica que corresponde a $P(\sigma) = \frac{1}{e} = 0.37$. La clasificación de las resistencias de las fibras se realiza utilizando un estimador dado por:

$$P(\sigma)_i = 1 - \frac{i}{N+1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde “ $P(\sigma)_i$ ” es la probabilidad de supervivencia correspondiente al i -ésimo valor de la resistencia y N es el número total de fibras probadas. Sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 1 se tiene:

$$\ln \ln \left[\frac{N+1}{N+1+i} \right] = m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

2.1.3. DEFECTOS EN LA MICROESTRUCTURA DE LAS FIBRAS

En relación a la microestructura de la sección transversal de las fibras vegetales agrupadas por su diámetro se puede destacar lo siguiente: (1) algunas fibras vegetales presentan secciones irregulares que no se adaptan a una sección circular como las de jute ([Figura 23](#)), otras se adaptan adecuadamente a esa geometría como las de abacá y las de cáscara de coco ([Figura 24](#)); (2) las fibras más grandes extraídas de palmas como las de durazno y talipot ([Figura 25](#)), y piassaba ([Figura 26](#)) presentan vacíos o lúmenes o principales; (3) las fibras vegetales independientemente de su diámetro presentan defectos o estructuras celulares lignificadas que podrían dividir a las fibras en varios sistemas vasculares como las fibras de ram ram ([Figura 22](#)); la probabilidad de la presencia de estos defectos es mayor en las fibras más grandes como las de durazno y piassaba; y (4) los defectos por su composición química son afectados drásticamente por el álcali, la degradación de la lignina y la hemicelulosa puede ocasionar cambios significativos en la microestructura de las fibras como la separación de sus tejidos vasculares o la desfibrilación ([Figura 27](#)).

Figura 22. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 31 µm y 68 µm: (a) Lino, (b) Ram Ram, (c) Curaua, y (d) Fibra de hoja de piña.

(Figura elaborada por el autor y adaptada de: (Amiri, Ulven, and Huo 2015; K. Charlet et al. 2007; Romhányi, Karger-Kocsis, and Czigány 2003; Munawar, Umemura, and Kawai 2007; Alves Fidelis et al. 2013))

Figura 23. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 86 μm y 112 μm: (a) Kenaf, (b) Fibra de hoja de sanseveriana, (c) Jute, y (d) *Manicaria saccifera*.

(Figura elaborada por el autor y adaptada de: (Munawar, Umemura, and Kawai 2007; Porras, Maranon, and Ashcroft 2015; Ferreira et al. 2016))

Figura 24. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 117 μm y 140 μm : (a) Abacá, (b) Sisal, y (c) Fibra de cáscara de coco.

(Figura elaborada por el autor y adaptada de: (Munawar, Umemura, and Kawai 2007))

Figura 25. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 795 μm y 1343 μm : (a y b) Palma de durazno, (c) Talipot, y (d) Palmira.

(Figura elaborada por el autor y adaptada de: (Satyanarayana et al. 1986; Diaz, Silva, and D'Almeida 2016))

Figura 26. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 795 μm y 1343 μm : (a y b) piassaba.

(Figura elaborada por el autor y adaptada de: (Alves Fidelis et al. 2013; Nascimento et al. 2012))

Figura 27. Microscopía electrónica de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* vistas en: (a) Sección transversal de la fibra al ambiente, (b) Superficie de la fibra al ambiente, (c) Sección transversal de la fibra después de exposición alcalina, y (d) Superficie de la fibra después de exposición alcalina.

(Microscopías del autor)

2.1.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la Figura 28 se muestra la composición química de los materiales lignocelulósicos. Las microfibrillas de celulosa están unidas por una matriz de lignina amorfa, que también actúa como un agente de protección contra el ataque fúngico, por su parte la hemicelulosa actúa como un compatibilizador entre la celulosa y la lignina (Manimaran et al. 2019).

De acuerdo con (Stokke, Wu, and Han 2013) la celulosa es un polímero lineal de cadena larga constituido por glucosa, el álcali no puede disolverla, pero si lo hace el ácido sulfúrico diluido, también se conocen otros solventes de celulosa como ciertos compuestos de amonio cuaternario; en cambio las hemicelulosas y las pectinas atraen moléculas de agua fácilmente y son considerablemente más solubles en álcali diluido como el hidróxido de sodio, en ácidos débiles, incluso en agua caliente; por su parte la lignina imparte rigidez a la pared celular, sirve como pegamento que mantiene unidas las células individuales, la lignina es hidrófoba se ablanda a temperaturas elevadas y se comporta como un material plástico; finalmente, los extractos son importantes en el enlace fibra – matriz de los materiales compuestos, aunque pueden eliminarse mediante tratamientos químicos relativamente suaves.

Las propiedades de resistencia a la tracción de las fibras naturales disminuyen al aumentar el contenido de lignina, hemicelulosa, pectina y cera (Fuqua, Huo, and Ulven 2012). Del mismo modo, las fibras con elevados contenidos de lignina afectan la compatibilidad fibra- matriz, y esto puede conducir a una reducción en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos (Sarasini and Fiore 2018).

El contenido de celulosa en la fibra influye en la absorción de agua de la fibra natural (Yusriah et al. 2014). La celulosa es de naturaleza polar (Rowell, Han, and Rowell 2000), por lo que la absorción de agua de las fibras naturales incrementen con el aumento su contenido (Shebani, Van Reenen, and Meincken 2009).

Figura 28. Composición química de los materiales lignocelulósicos: (a) Teoría de la matriz reforzada de la estructura de la pared celular, (b) Sección corta de una microfibrilla de celulosa (regiones cristalinas, semicristalinas y amorfas), (c) Modelo esférico de la lignina, y (d) Modelo molecular de la conformación de la hemicelulosa (xiloglucano o xilano) en asociación con un microfibril de celulosa).

(Fuente: (Stokke, Wu, and Han 2013))

2.1.5. ÍNDICE DE CRISTALINIDAD

La difracción de rayos X (XRD) es un método adecuada para notar la diferencia entre el material amorfo y el cristalino presentes en las fibras naturales (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014). La cristalinidad de las fibras afecta su absorción química, una cristalinidad más baja generalmente implica regiones amorfas más altas, que son más sensibles a los productos químicos y al agua (Jaouadi, M'sahli, and Sakli 2009). Por ejemplo, las fibras de *sansevieria cylindrica* presentan un IC igual al 60% (igual que el algodón, mayor que el ramio, y menor que el sisal, yute, lino, y cáñamo), y un tamaño de cristalito de 86 nm (mayor que el ramio, algodón, y lino), lo que implica una reducción en su reactividad química y su capacidad de absorción de agua (Sreenivasan et al. 2011).

El índice de cristalinidad como el tamaño del cristalito aumentan después del tratamiento con NaOH, debido a la eliminación de la hemicelulosa y la lignina (Elenga et al. 2013). Los valores más altos se obtuvieron para las fibras tratadas con una solución de NaOH al 5% (Sarasini and Fiore 2018).

Del mismo modo, el grado de cristalinidad se relaciona directamente con la tenacidad y el alargamiento de las fibras (el Oudiani et al. 2008). Por ejemplo, las fibras de *cissus quadrangularis* se caracterizan por un alto contenido de celulosa, un alto grado de cristalinidad y un ángulo microfibrilla bastante bajo, lo que sugiere propiedades mecánicas altas (Sarasini and Fiore 2018).

2.1.6. ÁNGULO MICROFIBILAR

El término ángulo de microfibrilla (MFA) se refiere al ángulo entre el eje largo de la fibra y las microfibrillas de celulosa a medida que se enrollan alrededor de la célula, generalmente se aplica a la orientación de las microfibrillas de celulosa en la capa S2 que constituye la mayor proporción del grosor de la pared celular, cuanto más inclinado es el devanado helicoidal más pequeño es el MFA, por lo tanto las espirales planas de las capas S1 y S3 tienen un MFA más grande, mientras que la espiral más pronunciada de la capa S2 tiene un MFA más pequeño (Figura 29); se han aplicado varias técnicas para medir el MFA como el microscopio de luz polarizada, tinción de yodo, espectroscopia del infrarrojo cercano (NIRS), sin embargo el método de más elección es la difracción de rayos X (Barnett and Bonham 2004). El ángulo microfilar se calcula utilizando la ecuación de deformación global (Indran and Raj 2015):

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = -\ln (\cos \alpha) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde “ ε ” es la deformación, “ α ” es el ángulo microfilar (MFA), $(\Delta L/L_0)$ es la relación de alargamiento.

Un MFA más bajo dicta las propiedades anisotrópicas generales de las fibras (elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc.), en términos de resistencia el MFA es inversamente proporcional a la rigidez de la fibra, un MFA más bajo determina mayor rigidez y resistencia de la fibra, un MFA más alto conduce a una mayor ductilidad en la fibra; si las microfibrillas están orientadas en espiral al eje de la fibra se va a encontrar que la ductilidad de las fibras es mayor, pero

si las microfibrillas tienen una orientación paralela al eje de la fibra las características de la fibra serán rígidas e inflexibles con alta resistencia a la tracción; además un MFA más bajo dicta una tensión de falla menor y un comportamiento de tensión – deformación no lineal de las fibras vegetales, mientras que el rango elástico es más pequeño para un MFA más alto, el rango plástico aumenta al aumentar el MFA (Djafari Petroudy 2017).

Altos porcentajes de celulosa y de cristalinidad de la celulosa y valores más bajos del ángulo microfibrilar resultan en valores altos de la resistencia a la tracción y módulo de Young, y valores bajos de la deformación de rotura (Bourmaud et al. 2013). Es decir, un mayor contenido celulósico y un MFA más bajo son esenciales para mayor rigidez y alta resistencia de la fibra (Satyanarayana et al. 1986; Mohanty et al. 2005).

Figura 29. Vista esquemática de una fibra en sección transversal, que muestra la definición de ángulo microfibrilar (MFA) en la microestructura de la pared celular de la fibra vegetal y la disposición en hélice de las microfibrillas de celulosa.

(Fuente: (Satyanarayana et al. 1986; Bourmaud et al. 2013))

2.1.7. CONTENIDO DE HUMEDAD

La resistencia aumenta con el contenido de humedad y disminuye a medida que aumenta la temperatura, el módulo de Young disminuye con el contenido de humedad (K. Charlet et al. 2007).

El contenido de humedad influye en la estabilidad dimensional, la resistividad eléctrica, la resistencia a la tracción, la porosidad y el comportamiento de hinchamiento de los compuestos reforzados con fibras naturales (Yusriah et al. 2014). Los compuestos reforzados con fibra de alto contenido de humedad son propensos a la descomposición en comparación con los compuestos reforzados con fibras de bajo contenido de humedad (Rowell, Han, and Rowell 2000).

Los tratamientos a base de álcali destruyen la estructura celular de las fibras, por lo tanto, reducen el contenido de vacíos de las fibras y esto puede conducir a una menor absorción de agua; los diámetros de las fibras tratadas son más pequeños que las fibras no tratadas, esto se debe a la eliminación de los componentes amorfos, el colapso de la estructura celular, la compresión de la estructura de lumen, y la reducción de la fracción de hemicelulosas (Reddy et al. 2012; Ridzuan et al. 2016).

2.2. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTICIA REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES

2.2.1. DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS VEGETALES EN MEDIOS ALCALINOS

En la [Figura 30](#) se muestra el efecto del agua sobre la interfaz fibra – matriz. Los compuestos de cemento reforzados con fibras naturales a medida en que envejecen sufren pérdidas significativas de sus propiedades mecánicas (Barra et al. 2015), esto se debe a la capacidad de absorción de agua de las fibras durante la etapa de curado responsable de cambios de volumen y perdidas de adhesión fibra – matriz (Huu et al. 2011), y al deterioro de las fibras en la matriz de cemento ocasionado por la hidrólisis alcalina de los componentes amorfos por la precipitación de los productos de hidratación del cemento sobre las paredes celulares de las fibras (Toledo Filho et al. 2000; Rocha et al. 2017).

(Wei and Meyer 2015) explican el proceso de degradación de las fibras vegetales en materiales compuestos de matriz de cemento de la siguiente manera: (1) la absorción de agua de las fibras naturales durante el proceso de mezcla y fraguado ocasiona la expansión de su volumen, durante el proceso de endurecimiento el cemento recupera parte del agua de las fibras para formar una solución de poros altamente alcalina en el espacio entre la matriz y la fibra causada por la retracción por secado, que a su vez acelera el deterioro de la fibra natural; (2) el proceso de degradación de las fibras naturales en medios alcalinos se produce en tres instancias: degradación de la lignina y parte de la hemicelulosa, seguido de la degradación total de la hemicelulosa (disminuye

la integridad y estabilidad de la pared celular), y la degradación del enlace de hidrógeno intramolecular (dispersión de las microfibrillas de la celulosa); (3) a medida en que avanza la degradación el silicato cálcico hidratado (CSH) y la portlandita (CH) se infiltran gradualmente en las paredes celulares ocasionando la mineralización y fragilización de las fibras, pudiéndose identificar dos mecanismos de mineralización: cristalización de la CH a través de nucleación y procesos de crecimiento de las paredes celulares, proceso en la que se daña la unión de los diversos componentes y se corroen las microfibrillas de celulosa, por otro lado, la automineralización, que consiste en un leve hidrólisis de la lignina y la hemicelulosa; y (4) la degradación alcalina de la celulosa se produce en tres etapas: la desconexión de los nanocristales de celulosa por oxidación en la punta reductora de las moléculas, la hidrólisis alcalina de ruptura de la unión hemiacetal, y la reacción de despuntado o peeling de la molécula (principal responsable de la degradación). La lignina y la hemicelulosa desempeñan un papel de barrera evitando que las paredes celulares se precipiten en fases minerales.

Figura 30. Efecto del agua sobre la interfaz fibra-matriz en morteros.

(Figura elaborada por el autor y adaptada de: (Azwa et al. 2013; Wei and Meyer 2015))

2.2.2. UNIÓN INTERFACIAL FIBRA- MATRIZ

La unión interfacial fibra – matriz cumple un rol fundamental en las propiedades mecánicas de los compuestos, la tensión se transfiere entre la matriz y las fibras a través de la interfaz, una interfaz demasiado fuerte provocaría la propagación de grietas que pueden reducir la tenacidad y la resistencia, en los compuestos reforzados con fibras vegetales generalmente hay una interacción limitada entre las fibras hidrófilas y las matrices hidrofóbicas, lo que conduce a una mala unión interfacial que limita el rendimiento mecánico y una baja resistencia a la humedad que afecta las propiedades a largo plazo (Pickering, Efendy, and Le 2016). Los pretratamientos de las fibras pueden mejorar su interacción con las matrices (Bousfield et al. 2018).

2.2.2.1. MODIFICACIÓN DE LAS FIBRAS

La modificación de las fibras puede ocurrir mediante mecanismos de enclavamiento mecánico o unión química. El enclavamiento mecánico se aplica en mayor medida cuando la superficie de la fibra es rugosa, se realiza con químicos sobre la superficie y en la matriz que pueden reaccionar para formar enlaces, en cambio la unión química puede lograrse mediante el uso de agentes de acoplamiento que actúan como un puente entre la fibra y la matriz, estos pueden ser el álcali, el acetilo, el silano, el bencilo, el acrílico, el permanganato, el peróxido, el isocianato, el titanato, el circonato el acrilonitrilo, o el uso de un agente de acoplamiento injertado con anhídrido maleado (Pickering, Efendy, and Le 2016).

También pueden usarse otros tratamientos como la polimerización con plasma frío de metano (Barra et al. 2015), tratamientos alcalinos con hidróxido de calcio (Ridzuan et al. 2015) o hidróxido de sodio (Li, Zhou, and Guo 2017), hornificación (Claramunt et al. 2011), o tratamiento hidrotérmico (Sawsen et al. 2015)

Por lo general, las fibras naturales se tratan con álcali para eliminar los componentes amorfos débiles, de modo que las fibras retengan los componentes cristalinos mejorando así la resistencia; el tratamiento con álcali elimina componentes como la hemicelulosa, la lignina, la pectina, la grasa y la cera; expone la celulosa y aumenta la rugosidad, lo que mejora la unión interfacial; también modifica la estructura de la celulosa, se ha observado que los tratamientos modestos provocan un aumento de la cristalinidad de la celulosa, mientras que los tratamientos más duros pueden convertir a la celulosa cristalina en un material amorfo (Beckermann and Pickering 2008; Kabir et al. 2012).

En la Tabla 2 se muestran las características de los tratamientos alcalinos y su efecto en los valores de la resistencia a la tracción y módulo de Young de las fibras vegetales. Por ejemplo (Achour, Ghomari, and Belayachi 2017) investigaron el efecto de varios tratamientos sobre las propiedades químicas y morfológicas de las fibras de dos plantas xerófitas con la finalidad de mejorar la adhesión fibras – matriz en un material compuesto de cemento, los tratamientos alcalinos con NaOH al 1% y 3% durante 30 minutos a temperatura ambiente resultaron en una mejora óptima del índice de cristalinidad, además incremento la rugosidad de la superficie de la fibra, se eliminaron materiales amorfos como lignina y hemicelulosa, y mejoró la adhesión fibra – matriz.

Particularmente el tratamiento con una solución acuosa de NaOH al 5% y un tiempo de exposición de 30 minutos resulta en la mayor solubilización de la hemicelulosa, además provoca que las fibrillas se vuelvan capaces de reorganizarse de manera compacta (un empaquetamiento más cercano de las cadenas de celulosa), lo que mejora la resistencia de la fibra y sus propiedades de tracción (Reddy et al. 2012; Ridzuan et al. 2016). En cambio, el tratamiento de las fibras con Ca(OH)_2 al 0.5% durante 50 minutos mejora los índices de cristalinidad, el comportamiento de extracción “pull out” por la interacción química entre el hidróxido de calcio restante y el carbonato de calcio adherido a la superficie de las fibras, además aumenta la rugosidad de las fibras dando como resultado una mayor adherencia fibra matriz caracterizada por la extracción por fricción que a su vez genera la abrasión de las fibras y su desfibrilación (Ferreira et al. 2015). Del mismo modo el tratamiento de las fibras con Ca(OH)_2 al 1% durante 30 y 60 minutos mejora la unión fibra – matriz impartiendo fricción máxima, esto por los depósitos de calcio sobre la superficie de la fibra y aumentó la rugosidad de la superficie, también aumenta el enlace químico fibra – matriz proporcionando una mejor interacción entre la fibra y la matriz (Zukowski, de Andrade Silva, and Toledo Filho 2018).

La inmersión de las fibras en una solución alcalina ya sea NaOH o Ca(OH)_2 traen beneficios en la unión fibra-matriz, sin embargo, los depósitos de calcio sobre la superficie de la fibra que deja el tratamiento con Ca(OH)_2 mejora la unión por fricción entre la fibra y la matriz, y aumenta el enlace químico. A más de ser más viable económicamente (Das and Chakraborty 2006), ecoeficiente, no contaminante y sostenible (Hernández-Olivares et al. 2020).

Tabla 2. Características a la tracción de las fibras vegetales tratadas con de álcali.

Tipo de fibras	Tratamiento	Relación de remojo	Tiempo de inmersión (horas)	Concentración en peso de la solución alcalina	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Referencia
Hierba Napier	NaOH acuoso	1:10 (1 gramo de fibra para 10 gramos de la solución)	24	Sin tratamiento	12.42	2.25	(M. Haameem et al. 2014)
<i>P. purpureum</i>	NaOH acuoso	Liquor ratio 40:1	24	Sin tratamiento	73	5.68	(Ridzuan et al. 2016)
				5%	141	4.86	
				7%	79	3.77	
				10	50	1.00	
				12	49	1.02	
				15	31	0.55	
Hierba Napier	NaOH acuoso	Liquor ratio 20:1 (20 Kilogramos de fibra para 1 litro de la solución)	0.5	Sin tratamiento	75	6.8	(Reddy et al. 2012)
				2%	111	8	
				5%	136	10.5	
Sisal	Ca(OH) ₂ acuoso	Solución al 0,73% en peso de Ca (OH) 2	0.8	Sin tratamiento	453.23	20,16	(Ferreira et al. 2015).
<i>Curatú</i>	Ca(OH) ₂ acuoso	-	0.5 - 1	0.5% - 1%	708.70	22,66	(Zukowski, de Andrade Silva, and Toledo Filho 2018)
				Sin tratamiento	735.19	28.7	
				1%	697.19	39.01	

2.2.3. MITIGACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS VEGETALES EN COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTICIA

Los materiales de construcción requieren una durabilidad adecuada para garantizar la longevidad del edificio y su rentabilidad, generalmente se suelen evaluar los parámetros de durabilidad como la resistencia al congelamiento – descongelamiento, resistencia a la exposición a la sal, resistencia al deterioro biológico (Jami, Karade, and Singh 2019). Esto se traduce a ensayos de ciclos de congelación – descongelación, exposición a la sal de cloruro de sodio, ciclos de inmersión y secado completos, y exposición microbiana. Especialmente en materiales compuestos de cemento Portland reforzados con fibras naturales es necesario controlar la descomposición natural de las fibras. Aunque se sabe que las fibras vegetales como las de cáñamo no se descomponen completamente dentro del material compuesto por la mineralización de las fibras, también se conoce que las partículas de las fibras mineralizadas se vuelven quebradizas, menos porosas y débiles a tensión (Marceau and Delannoy 2017).

2.2.3.1. DISMINUCIÓN DE LA ALCALINIDAD DE LA MATRIZ

Se puede disminuir la alcalinidad del mortero e incrementar la durabilidad de los refuerzos naturales sustituyendo parcialmente el cemento Portland por puzolanas, por ejemplo, cenizas volantes, humo de sílice (SF), metacaolín (MK), cenizas de cáscara de arroz (RHA); o combinaciones de puzolanas y minerales de arcilla, por ejemplo, metacaolín y bentonita.

Según (Wei and Meyer 2015) el ataque alcalino de la fibra natural es causado por la solución de poros de la matriz de cemento, por lo que controlar el valor de pH de la solución de poros a un nivel relativamente bajo es una manera eficaz de mitigar la degradación de los refuerzos naturales; la solución de poros del cemento está saturada con Ca(OH)_2 , durante la hidratación del cemento la alcalinidad está dominada principalmente por KOH y NaOH y los sulfatos correspondientes; el pH del cemento Portland se mantiene en un nivel de 13.1 durante las primeras 10 horas, luego aumenta hasta 13.7; el desarrollo de las concentraciones en la solución de poros se puede ajustar con materiales ricos en sílice y aluminato, los cambios de concentraciones en la solución de poros a edad temprana producen interacciones relacionadas con la reacción de silicato y la de aluminato, las concentraciones iniciales de iones hidróxido (OH^-) se reducen debido al efecto de dilución al reemplazar el cemento, por ejemplo al 30% de metacaolín (MK-30), su alto contenido de Al_2O_3 contribuye a la primera reacción de aluminato, la concentración de OH^- se reduce al mezclar MK y continúa disminuyendo con el tiempo de hidratación, no solo debido a los álcalis menos solubles en la matriz causados por el efecto de dilución, sino también debido a la unión de los álcalis en las cantidades adicionales de silicato cálcico hidratado (CSH) generadas por

la reacción pozolánica. Es decir, el pH de la solución de poros en las mezclas con MK-30, se redujo durante las primeras 8 h y luego siguió disminuyendo después del período de desaceleración y estabilización de la hidratación. Por lo tanto, al reducir la alcalinidad de la solución de poros se mitiga eficazmente el deterioro de la fibra natural, y se mejora efectivamente la durabilidad de los materiales compuestos a base de cemento.

También (Wei and Meyer 2016) señalan que el grado de hidratación, el contenido de hidróxido de calcio y la alcalinidad de la matriz de cemento juegan un papel decisivo en los ataques de álcali y la mineralización de las paredes celulares de la fibra. Por otro lado, la hidrólisis alcalina de los componentes amorfos de la fibra y la precipitación de los productos de hidratación del cemento en las paredes celulares de las fibras, es decir, mineralización, son las principales causas del deterioro de la fibra natural en el cemento. La durabilidad de las fibras vegetales (sisal) en compuestos de cemento pueden ser mejorados mediante el uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA); el papel de la RHA en la modificación del cemento es principalmente como un material complementario activo, aunque también tiene "efecto de relleno" en la matriz de cemento, la alta actividad pozolánica de la RHA a un nivel de sustitución de cemento de 30% en peso, se atribuye a su contenido de silicato que es comparable al humo de sílice, y a la gran superficie específica debido a su estructura de poro única. La RHA fina y la combinación de metacaolín y nanoarcilla producen una eficiencia similar para mitigar la degradación de la fibra de sisal, y son mejores que la RHA gruesa y las cenizas volantes.

Además (Wei and Meyer 2017) precisan que la mineralización y la hidrólisis alcalina de la fibra natural (sisal) pueden mitigarse mediante una sustitución acoplada de metacaolín y bentonita en el cemento Portland en un 30% en peso; el metacaolín mitiga la degradación de la fibra más eficazmente a temprana edad, mientras que las altas cantidades de minerales de silicio promueven el efecto complementario de la bentonita en la reducción de la alcalinidad de la matriz a largo plazo y en el deterioro de la fibra posteriormente; la combinación de estos dos minerales de arcilla valida su efecto sinérgico en la mejora de la hidratación del cemento y la mitigación de la degradación de las fibras en diferentes etapas del envejecimiento.

2.2.3.2. TRATAMIENTOS HIDRÓFUGOS

Con el objetivo de mejorar el enlace fibra matriz y disminuir la capacidad de absorción de las fibras vegetales en materiales compuestos de cemento, se han empleado recubrimientos efectivos como el aceite de linaza, mientras que otros recubrimientos como la pintura esmalte aún queda pendiente el estudio de los efectos a largo plazo en las propiedades mecánicas del compuesto, además de sus credenciales ambientales.

(Segetin, Jayaraman, and Xu 2007) con el objetivo de mejorar la unión interfacial de un material compuesto de suelo cemento reforzado con fibras vegetales, recubrieron las fibras de lino con pintura de esmalte, por medio de pruebas de extracción de las fibras observaron que la unión entre la superficie de la fibra y la matriz de suelo – cemento fue insuficiente, lo que señaló que el recubrimiento de pintura no ofrece ninguna mejora significativa en la unión. No fueron estudiadas los efectos del recubrimiento de la fibra sobre la durabilidad del material compuesto y la propia fibra.

(Basta, Sefain, and El-Rewainy 2011) con el objetivo de reducir la tendencia de las fibras de paja de arroz y aserrín por absorber agua en una matriz de cemento, y para superar los efectos secundarios de la exposición de las fibras a la humedad, emplearon como recubrimientos agentes químicos basados en materiales orgánicos e inorgánicos (una mezcla de gelatina - hexamina, silicato de sodio, y aceite de linaza). Los resultados mostraron que los tratamientos orgánicos investigados, especialmente el de aceite de linaza, eran eficaces en la reducción de la retención de agua de los ladrillos reforzados con fibras de paja de arroz y en los ladrillos con aserrín. Del mismo modo (Lee, Amaylia, and Info 2015) con el objetivo de reducir la tendencia de las fibras vegetales (provenientes de la cáscara de arroz, mazorca de maíz, y coco) por absorber agua en una matriz de cemento, y para superar los efectos secundarios de la exposición de las fibras a la humedad, emplearon como recubrimientos agentes químicos basados en materiales orgánicos e inorgánicos (una mezcla de gelatina- hexamina, aceite de linaza, y metasilicato de sodio- sulfato de aluminio); los resultados mostraron que los tratamientos orgánicos investigados, especialmente el de aceite de linaza fueron eficaces en la reducción de la retención de agua de los ladrillos reforzados con fibras de paja de arroz, con mazorca de maíz, y con fibras de coco. En ambos casos el recubrimiento con aceite de linaza consistió en distribuir homogéneamente el aceite sobre la superficie de la fibra por agitación manual, después las muestras se dejaron secar al aire a una temperatura entre 28°C y 30°C, para finalmente ser sometidas a un tratamiento térmico durante 2 horas a 120 ° C.

2.2.3.3. TRATAMIENTOS HIBRIDOS

Los tratamientos híbridos se han experimentado con éxito sobre las fibras vegetales, combinaciones entre hornificación e impregnación polimérica con estireno butadieno, y la combinación látex natural con una capa de puzolana son capaces de mejorar la resistencia a la flexión y la durabilidad de las fibras en la matriz de cemento.

Por un lado (Ferreira et al. 2015) investigaron los efectos de diferentes tratamientos (hornificación, tratamiento alcalino con hidróxido de calcio, impregnación de polímeros con estireno butadieno, y una combinación de hornificación e impregnación de polímeros) en las propiedades mecánicas de la fibra de sisal y la fuerza de unión con la matriz de cemento, después de los tratamientos superficiales las fibras mostraron la reducción de las hemicelulosas y la lignina, el aumento de la cristalinidad de la celulosa, la reducción de la capacidad de absorción de agua de la fibra, y el incremento de la resistencia a la tracción para todos los tratamientos, el recubrimiento de polímero actuó como un puente entre la matriz de cemento y la fibra para fortalecer la unión interfacial.

Por otro lado (E. J. da Silva et al. 2017) con el objetivo de desarrollar un nuevo material compuesto de cemento reforzado con fibras de coco con sus propiedades mejoradas y con la disminución de la cantidad de hidróxido de calcio sobre la superficie de la fibra, probaron combinaciones de látex natural, agua y materiales puzolánicos (humo de sílice y metacaolín) sobre la superficie de la fibra, el tratamiento desarrollado con película de polímero de látex y una capa de puzolana mejoró la resistencia a la flexión y la durabilidad de los materiales compuestos a base de cemento, el tratamiento resultó con la mayor tasa de conservación de masa en las pruebas de degradación de las fibras, los

Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación

análisis microestructura de las fibras tratadas y extraídas de material compuesto mostraron un aumento en la preservación de la estructura de la fibra contra el proceso de degradación. Este tratamiento puede ser una forma alternativa al uso de fibras vegetales en el desarrollo de nuevos materiales compuestos cementosos con buenas prestaciones mecánicas a largo plazo. El tratamiento consistió en insertar las fibras de coco en látex natural durante 60 segundos bajo agitación constante, posteriormente las fibras se colocaron en un recipiente lleno con humo de sílice o metacaolín para recubrir su superficie.

2.2.4. DISPERSIÓN DE LAS FIBRAS EN LA MATRIZ

La relación de aspecto¹³ de una fibra influye en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, en compuestos de fibra corta el esfuerzo de tensión en los extremos de la fibra es cero y aumenta a lo largo de la longitud de la fibra, por lo tanto una fibra debe tener una longitud mayor que la longitud crítica para que pueda romperse durante la carga de tensión (Matthews and Rawlings 1999), esa longitud tiene un límite, ya que las fibras muy largas aumentan aún más su tendencia a aglomerarse, una buena dispersión de las fibras promueve una buena unión interfacial y reduce los vacíos (Peltola et al. 2011). Según (Pickering, Efendy, and Le 2016) en la longitud crítica, antes de la fractura, la fibra teóricamente solo habría llevado la mitad de la carga en comparación con la de una fibra continua en la misma deformación compuesta, la longitud crítica varía con la fibra, la matriz, el tratamiento de la fibra, y el contenido de fibra, puede expresarse de la siguiente manera:

¹³ Longitud / diámetro

$$\frac{L_c}{d} = \frac{\sigma_f}{2\tau_i} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde “d” es el diámetro de la fibra, “ σ_f ” es la resistencia a la tracción de la fibra y “ τ_i ” es la resistencia interfacial.

Las fibras naturales con alta relación de aspecto son más favorable ya que posee una alta resistencia a la tracción (Saravana Bavan and Mohan Kumar 2010). Se puede atribuir un nivel óptimo de adhesión fibra – matriz a la preservación de la relación de aspecto alrededor de 60 (Tonoli et al. 2007).

2.2.5. ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LA MATRIZ

En la Figura 31 se muestra el esquema de esfuerzos mecánicos con respecto a la dirección de la carga, los materiales compuestos con mejores propiedades mecánicas se obtienen con las fibras alineadas en paralelo a la dirección de la carga aplicada (Pickering, Efendy, and Le 2016).

En este sentido (Norman and Robertson 2003) investigaron el efecto de la orientación de la fibra sobre el endurecimiento de polímeros con fibras de vidrio cortas, generalmente por debajo de su longitud crítica, los materiales se fracturaron con las fibras alineadas en tres orientaciones con respecto al plano de la grieta y la dirección de propagación, las fibras perpendiculares al plano de fractura denominadas “alineadas normalmente”, y fibras dentro del plano de fractura relacionadas con la dirección de propagación de las grietas denominadas “alineadas en paralelo al plano” y “alineadas en el plano normal”, los compuestos con las fibras alineadas normalmente al plano de

fractura fueron las más resistentes, los compuestos con fibras orientadas al azar fueron menos resistentes, y los compuestos con fibras alineadas dentro del plano de fractura fueron las menos resistentes (Figura 32).

La mayoría de los experimentos relacionados con las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz de cemento emplean fibras cortas de manera aleatoria, existe escasa información sobre otras formas de orientación como fibras largas dispuestas unidireccional, o fibras dispuestas como mallas con disposición ortogonal (Figura 33).

Figura 31. Esquema de esfuerzos mecánicos con respecto a la dirección de la carga: (a) Tracción perpendicular a la fibra, (b) Tracción paralela a la fibra, (c) Compresión perpendicular a la fibra, (d) Compresión paralela a la fibra, y (e) Flexión perpendicular a la fibra.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 32. Esquema de esfuerzos mecánicos con respecto a la geometría de la grieta: (a) Fibras perpendiculares al plano de fractura "alineada normalmente", (b) Fibras con la dirección a la propagación de la grieta "alineada en paralelo en el plano", y (c) Fibras con la dirección de propagación de la grieta "alineado en el plano normal".

(Fuente: (Norman and Robertson 2003))

Figura 33. Tipos de compuestos fibrosos: (a) de forma unidireccional “fibras largas”, (b) de manera aleatoria “fibras cortas”, y (c) con disposición ortogonal “mallas ortogonales”.

(Fuente: (Olivares Santiago, Galán Marín, and Roa Fernández 2003))

2.2.6. FRACCIÓN VOLUMÉTRICA

Existe una fracción de volumen de fibra adecuado que se puede incorporar en un material compuesto, una fracción muy alta puede resultar en un material de mayor porosidad y de mayor absorción de agua que conduce a la degradación de sus propiedades a largo plazo; en cambio, una fracción de volumen de fibra por debajo de la fracción de volumen crítico, desde una perspectiva de mecánica de fractura cuando las fibras fallan la matriz puede hacer frente a la carga transferida desde las fibras fallidas, y las fibras actúan simplemente como agujeros dentro de la matriz (Pickering, Efendy, and Le 2016).

Por su parte (MA Ismail 2007) al observar las propiedades mecánicas de un material compuesto de cemento reforzado con varias fracciones de volumen de fibras de Roselle destaca los siguientes aspectos: (1) con un bajo contenido de volumen de fibras entre el 0.3% a 1.5% la resistencia a la compresión y la densidad aparente aumentan ligeramente en comparación con el compuesto sin fibra, la mayor resistencia y densidad se obtienen en la relación fibra – cemento de 0.3%, el aumento de la resistencia a la compresión y la densidad aparente se explica por la homogeneidad y alta compactación entre las fibras y la matriz, disminuyendo los vacíos y reduciendo la porosidad del material, a medida que el contenido de fibra excede el valor de 1.5% la resistencia a la compresión y la densidad aparente disminuirán; (2) con un contenido de volumen de fibra menor al 0.3% la resistencia a la tracción se reduce, mientras que la densidad aparente incrementa por la alta compactación entre la fibra y el cemento; (3) cuando el contenido de fibra excede el 0.3% la densidad aparente disminuye gradualmente, mientras que la resistencia a la tracción aumenta.

Del mismo modo (Ozerkan et al. 2013) estudiaron las propiedades mecánicas de un material compuesto de cemento reforzado con porcentajes variables de fibras de palma datilera, observaron que la incorporación del 1% al 2% de fibras mejora la resistencia del material contra el ataque de sulfatos, recomendando que la inclusión de fibras en material compuesto se limite a menos del 2% en peso.

En cambio (Achour, Ghomari, and Belayachi 2017) investigaron el efecto de aumentar las tasas de inclusión de dos fibras: Doum “*Chamaerops humilis*” y Diss “*Ampelodesmos mauritanicus*” tratadas con NaOH al 1% y 3% respectivamente; los materiales compuestos reforzados con 2% de fibras Diss tratadas y con 1,5% de fibras Doum tratadas mostraron alta resistencia a la flexión, sin embargo los materiales disminuyeron su densidad aparente y resistencia a la compresión, y aumentaron su porosidad y absorción de agua, además se redujo la conductividad térmica de las muestras, lo que aumenta la capacidad de aislamiento de los compuestos, a su vez la conductividad térmica de los compuestos disminuyeron con la disminución del contenido de agua de la muestra, también disminuyó la absorción de calor, lo que puede reducir el proceso de combustión durante un incendio accidental.

(Çomak, Bideci, and Salli Bideci 2018) fabricaron materiales compuestos de cemento reforzado con fibras de cáñamo con diferentes proporciones: 0%, 1%, 2%, y 3%, y diferentes longitudes: 6 mm, 12 mm, y 18 mm, determinaron que el 2% de adición de fibra afectan positivamente la resistencia a la compresión mientras que los materiales de cemento reforzados con un volumen del 2% al 3% y 12 mm de longitud son los más óptimos.

En complemento (Ahmad and Ibrahim 2010) investigaron la contracción por secado de columnas de hormigón con diferentes porcentajes de volumen de fibras del tronco de la palma de aceite: 0%, 1%, 2%, 3% y 4% del volumen total de material compuesto, encontraron que al aumentar el contenido de fibra se reduce la contracción por secado y se controla el agrietamiento.

De los estudios mencionados se puede destacar que, para obtener contribuciones en las propiedades mecánicas de los compuestos de cemento, el volumen crítico inferior de inclusión de fibras es el 0,3% y el volumen crítico superior de inclusión de fibras es el 2%. Valores superiores ayudan a controlar el agrietamiento de los materiales compuestos a base de cemento.

2.2.7. FABRICACIÓN DEL MATERIAL

La mezcla de las fibras naturales en materiales compuestos de cemento a gran escala es una tarea problemática que puede comprometer la viabilidad de su uso en morteros y hormigones. La principal preocupación es el enredo de las fibras lo que hace muy difícil obtener una mezcla homogénea.

(Segetin, Jayaraman, and Xu 2007) con el objetivo de mejorar la resistencia y la ductilidad de un material compuesto de matriz suelo – cemento reforzado con fibras de lino, experimentaron con longitudes de fibra de 70 y 85 mm junto con contenidos de fibra de 0.6% y 0.8%, se percataron que la composición del material en relación a la

longitud y el contenido de fibras no es crítica para mejorar la ductilidad del material, en cambio, estos parámetros se relacionan más con la fabricación y la trabajabilidad de la mezcla, para reducir las dificultades de fabricación estudiaron diferentes técnicas entre ellas la mezcla manual y la mezcla de tambor; encontrando que 85 mm representa el límite superior en la longitud de la fibra para la técnica de mezcla manual, mientras que se logró un nivel máximo de contenido de fibra del 0,8%; en cambio, con la técnica de mezcla de tambor mejoró la uniformidad de la mezcla y la facilidad de fabricación para los dos niveles de contenido de fibra, recomendando adoptar un contenido de 0.6% ya que esto mejora la facilidad de fabricación y minimiza la cantidad de fibra requerida.

2.2.8. APLICACIONES

La propiedad de absorción de humedad de las fibras naturales en compuestos de cemento afecta negativamente su durabilidad y sus características mecánicas. Sin embargo, algunas aplicaciones pueden concretarse en climas cálidos donde esta propiedad puede verse como una ventaja (AlShaya et al. 2018). Otro aspecto a considerar de las fibras naturales es que no pueden resistir entornos alcalinos como el de las matrices de cemento. Por tal razón es necesario realizar más investigaciones respecto alternativas de pretratamientos para las fibras que puedan mejorar las propiedades físicas y mecánicas del compuesto durante un largo período de tiempo.

La industria aún no ha adoptado la producción de compuestos estructurales de fibra natural a gran escala debido a sus desafíos que incluyen la inflamabilidad y la falta de confianza en su rendimiento estructural, sin embargo los compuestos fibrosos basados en fibras naturales menos comunes pueden ofrecer beneficios y aplicación directa en

Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación
sociedades rurales, especialmente en las regiones menos desarrolladas donde estas fibras son abundantes (Sarasini and Fiore 2018).

Por ejemplo (Roma, Martello, and Savastano 2008) analizaron las propiedades físicas, mecánicas, y térmicas de tejas a base de cemento reforzadas con fibras de sisal y eucalipto, encontraron que la exposición al clima tropical causó una severa reducción de las propiedades mecánicas de los compuestos por la mineralización de las fibras por la alcalinidad de la matriz, y por el microcraqueo progresivo de la matriz de cemento; en relación a las propiedades físicas del compuesto, el contenido de fibra influyó más que el tipo de refuerzo; en relación a las propiedades mecánicas el tipo de fibra fue la variable principal, las tejas reforzadas con sisal mostraron mayor resistencia a la flexión: en relación a las propiedades térmicas las tejas reforzadas con fibra vegetal son aceptables como sustitutos de asbesto en láminas de cemento que aún se usan en varios países en desarrollo, pudiéndose optimizar el material a través del refinamiento de la estructura de poros y el uso combinado de fibras vegetales y sintéticas como refuerzo.

Pese a las restricciones las fibras vegetales han logrado ser empleadas como refuerzos estructurales en materiales a base de cemento, por ejemplo (Segetin, Jayaraman, and Xu 2007) desarrollaron un ladrillo de suelo – cemento reforzado con fibras de la planta de lino de Nueva Zelanda impregnadas con un recubrimiento de pintura de esmalte, cumplieron con el estándar de construcción de tierra de Nueva Zelanda, además la adición de fibra en la matriz mejoró significativamente la ductilidad del material al eliminar el patrón de falla catastrófica observado en las muestras sin refuerzo, sin embargo la unión interfacial fue insuficiente entre la superficie de la fibra y la matriz

suelo – cemento, lo que mostró que el recubrimiento de pintura no ofreció ninguna mejora significativa en la unión.

Por otro lado, existen muchos estudios que buscan nuevas aplicaciones de las fibras naturales para la fabricación de materiales en los que la resistencia no sea el requisito más importante. Las fibras naturales en relación a las fibras industrializadas presentan baja densidad por lo que pueden ser una opción para el desarrollo de productos ligeros. Otra buena opción es el desarrollo de aislantes térmicos y acústicos, la incorporación de fibras naturales de origen vegetal en la construcción de edificios puede reducir los costos de manejo de materiales y la transferencia de calor en los edificios (Onuaguluchi and Banthia 2016). Por ejemplo (Khedari, Watsanasathaporn, and Hirunlabh 2005) desarrollaron un nuevo tipo de bloque de suelo – cemento con fibra de coco, concluyendo que el uso de esta fibras como refuerzo reduce la conductividad térmica y el peso del bloque convirtiéndolo en un material con un prometedor desarrollo comercial.

Además (Achour, Ghomari, and Belayachi 2017) recomiendan el uso de las fibras vegetales en pavimentos de bloques, tableros de cemento, ladrillos entrelazados, tuberías de cemento, alcantarillado pluvial, falso techo, revestimiento exterior y aplicaciones no estructurales de trabajos de acabado, destacando el rendimiento térmico de los compuestos, también recomendaron el uso de las fibras en tejas como sustitutos de las láminas de fibrocemento, paneles sándwich, morteros livianos aislantes y bloques de hormigón para la fabricación de edificios ecológicos sostenibles.

En complemento (Mo et al. 2016) al observar que los materiales convencionales para la fabricación de hormigón no son totalmente respetuosos con el medio ambiente propusieron la reutilización de materiales de desecho agrícolas en el hormigón como materiales puzolánicos (SCM), utilizaron las cenizas quemadas de materiales de desecho agrícolas como remplazo parcial de agregado en el mortero, o como refuerzo al utilizar las fibras naturales recicladas. En este sentido (Gunasekaran, Kumar, and Lakshmipathy 2011) desarrollaron un hormigón con cáscara de coco (CSC) como agregado grueso, obtuvieron un hormigón estructural ligero de mejor trabajabilidad y mayor resistencia al impacto que el mortero convencional con una resistencia de unión comparable con la resistencia de unión de hormigones con agregados normales y otros agregados livianos, demostraron que las cáscaras de coco cumplen los requisitos para su uso como agregado ligero en hormigones. Por su parte (Correia et al. 2014) desarrollaron un hormigón con pulpa de bambú organosolv, demostrando que esta fibra no convencional no maderera puede aplicarse en combinación con matrices inorgánicas basadas en cemento Portland con una sustitución parcial de metacaolín. Así mismo (Ismail and Jaeel 2014) desarrollaron un mortero ecológico, que consistió en reemplazar parcialmente la arena por ceniza de Arundo donax o caña gigante y fibras de caña gigante secadas al ambiente, de ese modo también demostraron que la integración de las especies agrícolas agresivas como la caña gigante en mezclas de hormigón representa una alternativa amigable con el medio ambiente para el manejo de residuos de esta indeseable planta silvestre. Todo esto minimiza el impacto negativo al medio ambiente, además de garantizar y la reducción en la eliminación de desechos de estos sectores.

2.2.9. CREDENCIALES AMBIENTALES

El empleo de fibras vegetales en materiales compuestos de cemento trae ventajas ambientales, según (Marceau and Delannoy 2017) la reacción de carbonatación es una reacción natural que tiene lugar entre el CO_2 del aire circundante y la cal hidratada o portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, procede de la superficie al núcleo de los hormigones por difusión de CO_2 gaseoso en los poros abiertos, la reacción es muy lenta debido a la baja concentración de CO_2 en la atmósfera y depende de la naturaleza de la fase aglutinante, de la red de poros y de la humedad relativa; la formación de carbonato de calcio o calcita (CaCO_3) induce a un aumento de la densidad aparente del material y a una disminución de su porosidad y su alcalinidad; por lo tanto, esta variación de la microestructura puede influir en las propiedades funcionales de los materiales como el comportamiento mecánico, térmico y acústico. El material compuesto de cemento se beneficia de un fenómeno útil llamado secuestro de carbono, que es la capacidad de un material para almacenar carbono dentro de sí mismo de una forma estable (Jami, Karade, and Singh 2019). El mecanismo de secuestro de carbono del hormigón con fibras vegetales tiene dos partes: biogénico y no biogénico; el componente biogénico del material, es el resultado directo del dióxido de carbono atmosférico absorbido por la planta a través de la fotosíntesis durante su crecimiento, y el componente no biogénico corresponde al dióxido de carbono atmosférico absorbido por el aglutinante que envuelve las fibras en una matriz endurecida durante la carbonatación. Por ejemplo el balance general de emisiones del hormigón de cáñamo es muy favorable gracias a la absorción biogénica de CO_2 durante el crecimiento del cáñamo y a la absorción de CO_2 por carbonatación (Arrigoni et al. 2017). Se considera que 1 m³ de muro de hormigón de cáñamo puede secuestrar más de 100 kg de CO_2 (Bevan and Woolley 2008).

2.3. PIASSABA DE APHANDRA NATHALIA

Piassaba es la denominación de las fibras rígidas de color marrón consideradas un producto forestal no maderero, provienen de *Aphandra natalia* en el amazonas occidental de Ecuador, la extracción de las fibras es sostenible y representan un recurso de gran importancia económica para la industria de las escobas (Kronborg et al. 2008). Las fibras se originan de la vaina de la hoja y del pecíolo, y para cosecharlas se deben cortar las hojas (Pedersen 1996).

Varias son las aplicaciones de *Aphandra natalia*; por un lado, en la construcción de viviendas, ocasionalmente el tronco es utilizado como soporte vertical y vigas de techo y pisos, las hojas sirven para el techado en algunos casos son colocadas solamente en los bordes para cubrir las cumbreras del techo; por otro lado, en Herramientas y utensilios, las hojas tiernas son utilizadas en canastos para el traslado de frutos o animales muertos desde el bosque, las fibras extraídas de la base de las hojas son utilizadas para la fabricación de escobas, las hojas son también utilizadas para la fabricación del “capillejo” y el “cargajo” (material para empujar los dardos en las cerbatanas), las venas principales de las pinnas debidamente liberados de sus laminas, son utilizados para extraer larvas que se desarrollan en los troncos de otras especies, los frutos maduros son recolectados y consumidos cocidos, también son utilizados para la elaboración de bebidas; las semillas inmaduras son consumidas (Balslev et al. 2010).

En complemento (Borgtoft Pedersen 1992) detalla la extracción de las fibras de la palma y el procesamiento comercial de las fibras; para la extracción se usa el machete los cortes se dan hacia abajo a lo largo de ambos lados del pecíolo con el fin de separar las fibras; a continuación, el pecíolo se corta alrededor de un metro por encima de la base y luego se corta parcialmente cerca de la base; el muñón restante se dobla hacia atrás y la vaina de la hoja se libera de ella usando el machete; después se retira el tocón y se corta a lo largo de la base de la vaina de la hoja fibrosa que rodea completamente el vástago y elimina todo el haz de fibras; el haz de fibras (por lo general alrededor de 1,5 m de largo) se limpia sacudiendo la parte basal del paquete contra el tronco de la palma con el fin de dividir la parte dura de la vaina de la hoja y facilitar la separación de las fibras; la preparación de las fibras consiste en limpiarlas y cortarlas en longitudes adecuadas, el primer paso es humedecer las fibras sumergiéndolas en agua, si las fibras están demasiado secas se pueden romper durante la limpieza; sosteniendo el paquete humedecido en la parte basal, la parte superior se limpia con un instrumento dentado hecho de un pedazo de madera con los clavos sobresalientes; posteriormente los basales de 35 cm del haz y la vaina de la hoja dura se cortan y limpian por separado; luego se humedece de nuevo y golpean con un martillo para separar las fibras, por lo general es necesario repetir este proceso varias veces antes de que el "tapete" de fibras este lo suficientemente floja como para ser limpiado en el cardo fibras y ser cortados a una longitud de 35 cm; las fibras son el principal producto económico de *Aphandra natalia* se utilizan para producir escobas, estas pueden ser producidas por pequeñas industrias locales, o en las fábricas más grandes ubicadas en Quito, Cuenca y Guayaquil; se producen diferentes calidades de escobas algunos se hacen exclusivamente de las fibras de las vainas foliares, otras de las fibras de los pecíolos más suaves y delgadas, he incluso una mezcla de los dos tipos; la calidad de las fibras es considerada baja porque

Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación
se desgastan rápidamente, no han tenido demanda a nivel internacional como las fibras de *Leopoldinia piassaba* Wallace y *Attalea funifera* Mart.

Las fibras de *Attalea funifera* y *Leopoldinia piassaba* se han caracterizado y utilizado experimentalmente como refuerzos de matrices poliméricas encontrando aplicabilidad en materiales que exigen buena resistencia al impacto y mayor dureza (Sergio N Monteiro et al. 2006; Shimazaki and Colombo 2010). Pero piassaba de *Aphandra natalia* no se han estudiado ni empleado experimentalmente en materiales de construcción.

2.4. MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS

El Clinker es el principal componente de los cementos su producción es la responsable de la liberación de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), el impacto ambiental que genera puede reducirse a medida que se reemplace por materiales cementantes suplementarios (SCM) (P. K. Mehta 2009). Por un lado, muchos subproductos industriales sólidos como los materiales silíceos y aluminosos (cenizas volantes, humo de sílice, escorias, etc.), así como algunos materiales puzolánicos naturales (tobas volcánicas, tierra de diatomeas, etc.) pueden considerarse como SCM ya que exhiben propiedades cementosas y/o puzolánicas (V G Papadakis and Tsimas 2002). Por otro lado, entre los SCM también se encuentran los desechos agrícolas como las cenizas de cáscara de arroz (RHA), cenizas de palma de aceite, cenizas de bagazo de caña de azúcar, cenizas de hojas de bambú, las cenizas de mazorca de maíz, entre otros (Aprianti S 2017). Los SCM influyen positivamente sobre la resistencia del hormigón contra la carbonatación y la entrada de cloruro, por ejemplo se ha encontrado

que las muestras que incorporan humo de sílice o cenizas volantes ya sea como sustituto parcial de los agregados o del cemento, cuando se exponen a cloruros exhiben un contenido de cloruro total significativamente menor para todas las profundidades desde la superficie (Vagelis G Papadakis 2000).

2.4.1. HUMO DE SÍLICE

El humo de sílice (SF) es un subproducto del proceso de fundición de la industria del silicio y el ferrosilicio, es muy efectivo en el diseño y desarrollo de hormigones de alta resistencia, la naturaleza no biodegradable de los desechos industriales del SF aumenta la gravedad de los problemas ambientales. El uso de materiales de desecho en la industria del cemento y la construcción puede ser una solución viable para evitar la extinción de los recursos naturales.

(Siddique 2011) destaca las consecuencias de la adición de SF en las propiedades de la pasta de cemento y el mortero endurecido: (1) aumenta la resistencia a la compresión de 28 días; (2) no tiene una influencia significativa en la resistencia a la rotura por tracción del mortero, sin embargo provoca un aumento constante en la resistencia a la flexión con un aumento en el porcentaje de reemplazo; (3) el aumento del nivel de reemplazo de SF aumenta el módulo secante del mortero; (4) la inclusión de SF en altos niveles de reemplazo aumenta la retracción autógena del hormigón, debido al refinamiento de la distribución del tamaño de poro que conduce a un aumento adicional de la tensión capilar, y a una mayor contracción de la pasta de cemento; y, (5) la tensión de contracción plástica aumenta, al aumentar la dosis de SF.

Del mismo modo (A. Mehta and Ashish 2020) destacan las consecuencias de la adición del SF en las propiedades de trabajabilidad, resistencia y durabilidad del hormigón, así como las contribuciones en su microestructura, precisan los siguiente: (1) El SF mejora la resistencia a la compresión, a la rotura, y a la flexión del hormigón por la hidratación acelerada del cemento; (2) la resistencia del material incrementa hasta con el 20% de reemplazo de cemento por SF, pero el máximo aumento se logra con reemplazos de cemento por SF entre la 10% y 15%; (3) la resistencia del hormigón con SF incrementa con el aumento de las edades de curado en comparación con el hormigón de control; (4) la adición de SF por encima del 20% disminuye la resistencia del hormigón debido a la disminución del contenido de hidróxido de calcio con el aumento del contenido de humo de sílice; (5) la Incorporación de SF hasta un 25% mejora las propiedades de durabilidad del hormigón, las cantidades óptimas de reemplazo son hasta el 15% de SF por cemento; (6) las propiedades de durabilidad se vieron afectadas si el contenido de humo de sílice supera el 25%; (7) el aumento de las propiedades de durabilidad es proporcional al aumento de la edad de los materiales, por las reacciones puzolánicas del humo de sílice que reduce la porosidad del material; (8) la cantidad de SF que no se desintegra por completo, introducida en la reacción de hidratación, podría causar una mejora en la microestructura del hormigón en edades posteriores; (9) las propiedades de durabilidad del hormigón se mejoran con la incorporación de SF debido a la elevada área específica del humo de sílice; (10) El SF aumenta la velocidad de reacción de hidratación; y (11) El SF retrasa ligeramente la resistencia debido a la formación de silicatos de calcio hidratados derivados de las reacciones del SF y el hidróxido de calcio.

En complemento, si se desean menores costos y mayores niveles de reemplazo de cemento, el SF es considerado como el SCM más efectivo para disminuir la densidad del material compuesto de cemento como agregado liviano (Mo et al. 2017).

2.4.2. CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ

Los desechos agrícolas como las cenizas de cáscara de arroz (RHA) no pueden utilizarse como alimento para animales por sus bajos niveles nutricionales, tampoco es conveniente su degradación natural en los terrenos por la disminución del contenido de carbono que les ocasiona, sin embargo, puede producirse una remediación a través del reciclaje de las cenizas resultantes de la combustión controlada de la biomasa (Bentsen, Felby, and Thorsen 2014; Thomas 2018).

Las RHA obtenidas por quema a cielo abierto acarrear problemas de contaminación y la mala calidad de la ceniza. Las RHA de color negro con algunas partículas grises son el resultado de diferentes etapas de combustión del carbón durante la quema de la cáscara de arroz, mientras que las RHA activadas térmicamente presentan un tamaño de partículas reducido y una coloración gris por la mayor presencia de óxido de sílice y el menor contenido de carbono.

Se consideran como temperaturas óptimas de calcinación aquellas en las que todo el contenido de carbono se expulsa al final del proceso, en la combustión de la cáscara de arroz al desaparecer la lignina y la celulosa quedan las cenizas compuestas por sílice. La temperatura y duración de la activación térmica pueden determinar formas amorfas o cristalinas de sílice, por ejemplo (Della, Kuhn, and Hotza 2002) con el objetivo de

obtener RHA de sílice activa y de alta superficie específica, calcinaron las RHA a diferentes temperaturas y tiempos, sin embargo a 700°C por 6 horas consiguieron una ceniza con 95% de óxido de sílice con formas amorfas, en cambio para las muestras calcinadas a 400 °C durante 6 horas, y 500 °C durante 1, 3, y 6 horas observaron un proceso de cristalización insipiente del óxido de sílice. Las formas cristalinas indican un material con baja reactividad.

La obtención de RHA amorfa y porosa está condicionada a la fuente de la materia prima, el método de incineración, la temperatura y la duración de la combustión. Es muy importante que la buena calidad de RHA se acompañen con el menor consumo de energía en los procesos de obtención. La actividad puzolánica de RHA se presenta entre 500 °C a 700 °C (Nair et al. 2008), otros investigadores precisan entre 600 °C a 700 °C (Martirena and Monzó 2017). Aunque en todos los casos se han sugerido diferentes tiempos de procesamiento, según (Al-khalaf et al. 1984) a medida que aumenta la temperatura de combustión se reduce la superficie específica de RHA por la disminución del contenido de carbono, lo que muestra que las partículas de carbono son demasiado finas y con un área superficial mayor que las partículas de sílice.

Se puede mejorar la actividad puzolánica de RHA a través de molienda. La molienda es apropiada hasta cierto tamaño de partícula, permite reducir los efectos adversos producidos por el alto contenido de carbono, y permite aumentar la homogeneidad de las cenizas (Chao-Lung, Anh-Tuan, and Chun-Tsun 2011). Al aumentar el tiempo de molienda disminuye el tamaño de partícula promedio y la densidad aparente, mientras que el área de superficie específica aumenta, la molienda durante 60 minutos imparte mayor resistencia al material compuesto de cemento; para RHA molidas el desarrollo

de la resistencia a la compresión puede presentarse con un remplazo de cemento del 20% en relación al peso, para RHA no molidos el 15% en peso puede considerarse satisfactorio, en cambio para el desarrollo de la resistencia a la tracción el 20% de reemplazo en peso es óptimo (Alex, Dhanalakshmi, and Ambedkar 2016). La incorporación de RHA fina mejora la resistencia del material compuesto de cemento por la mejor dispersión y efecto de relleno y mejora la reacción puzolánica, aunque las diferencias en la composición química de las cenizas de cascarilla de arroz con diferentes finuras del mismo lote son pequeñas (Rukzon, Chindaprasirt, and Mahachai 2009).

Según (Fapohunda, Akinbile, and Shittu 2017) la RHA como sustituto parcial de cemento mantiene las densidades del material en el rango del hormigón normal, no limitando sus aplicaciones, sin embargo, incrementa la demanda de agua por la mayor área superficial de sus partículas y el alto contenido de carbono; otras afectaciones dependen del porcentaje de sustitución: (1) del 5% al 10% no afecta la trabajabilidad de la mezcla, a mayores adiciones podría requerirse mayor cantidad de agua siendo necesario el uso de agentes reductores de agua; (2) con el 10%, puede desarrollarse una resistencia a la compresión comparable con las muestras de control; (3) del 5% al 15% puede aumentarse la resistencia a la abrasión, tensión, y tracción; (4) las mezclas con el 10% y 15% pueden mejorar la permeabilidad; (5) del 15% al 20% se reduce el potencial de corrosión, la carbonatación, la penetración de cloruro, ácido y ataque de sulfatos; (6) el 20% incrementa la resistencia a la compresión a largo plazo (equivalente a muestras de control a los 270 días, y superior a los 360 días de curado); (7) hasta el 30% a edades de 28 y 91 días se reduce la porosidad y la absorción de agua, después de

14 días de curado se incrementa la resistividad eléctrica; y (8) del 20% al 40% podría reducirse la contracción por secado y la contracción autógena.

Los efectos positivos de las RHA en materiales compuestos de matriz de cemento la convierten en un material que ayudaría a resolver los impactos negativos del proceso de fabricación del cemento como las emisiones de CO₂, el agotamiento de recursos, y el consumo de energía, así mismo, permitiría resolver el problema de la eliminación de buena parte de los residuos sólidos generados por la agricultura.

2.4.3. POLVO FINO DE MORTERO DE CEMENTO RECICLADO

La búsqueda de nuevas opciones para aprovechar los residuos procedentes de la construcción, conduce al estudio del potencial de los agregados reciclados. Según (Evangelista et al. 2015) los agregados reciclados son materiales compuestos formados por cemento, agregados, y eventualmente sustitutos parciales del cemento, clasificados en dos grupos: (1) agregados gruesos reciclados, cuya incorporación en el hormigón es aceptada con restricciones por la industria de la construcción, y (2) agregados finos reciclados, excluidos de la producción de hormigones y morteros debido a que presentan alta heterogeneidad, alta capacidad de absorción de agua y contenido de contaminantes debido al proceso de reciclaje. Sin embargo, esto depende de los procesos de producción y pretratamientos. Reportes señalan que los agregados finos reciclados, pueden ser usados como sustitutos de los agregados finos naturales (Evangelista and de Brito 2007), o como remplazo parcial del cemento (Ashiquzzaman and Hossen 2013) en la producción de morteros.

(Xinwei, Zhaoxiang, and Xueying 2010) con el objetivo de reutilizar los residuos de los áridos y la pasta de cemento, quemaron los escombros de hormigón a 750 ° C para después mezclarlos con cemento Portland; observaron que la pasta de cemento deshidratada pulverizada volvió a tener reactividad, concluyendo que: (1) los residuos de hormigón y mortero de cemento de construcción y demolición pueden descomponerse a 750 ° C, los áridos y la pasta de cemento se separan entre sí y la pasta de cemento se deshidrata; (2) los residuos de hormigón y mortero de cemento de la construcción y demolición podrían reciclarse y reutilizarse para la fabricación de nuevos productos de construcción.

Por su parte (Yu, Shui, and Dong 2013) investigaron la pasta de cemento deshidratada modificada (M-DCP) como aditivo de cemento; la obtención de la materia prima consistió en mezclar cementos deshidratados (DCP) con etanol y hexametáfosfato de sodio, la mezcla se trató con dispersión ultrasónica durante 4 horas, después de un cuidadoso secado y recolección obtuvieron las partículas modificadas de cemento deshidratado para ajustar artificialmente la consistencia, los tiempos de fraguado y la resistencia a la compresión del cemento; finalmente precisaron que los DCP pueden obtenerse y pretratarse a partir de finos de hormigón reciclado.

Un caso especial de los agregados finos reciclados es el polvo fino de mortero reciclado (BRM) que a base de tratamientos térmicos puede conseguirse una materia prima rica en óxido de sílice denominada polvo fino de mortero reciclado calcinado (BRMF). (Aguirre-Maldonado and Hernández-Olivares 2017) buscaron aprovechar los residuos finos procedentes de la trituración de hormigón y mortero en desuso a través de tratamiento térmico, estudiaron experimentalmente el BRMF combinado con cemento

Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación
nuevo, determinando que la utilización directa de este material afecta negativamente a la resistencia a la compresión del material compuesto, alcanzando en la mayoría de las probetas del 21% al 54% de la resistencia a la compresión normal, por lo cual recomendaron no usarlo directamente en la mezcla para fabricar mortero u hormigón. Sin embargo, existen pocas investigaciones que puedan ayudar a utilizar BRMF en la práctica.

2.5. AGENTES HIDRÓFUGOS

2.5.1. LÁTEX DE CAUCHO NATURAL

El látex de caucho natural (NRL) es obtenido del árbol *Hevea Brasiliensis* adopta una conformación irregular en estado sólido, no puede cristalizar en condiciones normales y, por lo tanto, es un material amorfo y gomoso, una composición típica de NRL es la siguiente: contenido total de sólidos (TSC) 36%; contenido de fibra seca (DRC), 33%; proteínas, entre el 1% al 1.5%; resinas, entre 1% al 1.5%; cenizas, menos del 1%; azúcares, entre el 1% al 1.5%; y agua, aproximadamente 60% (Nor and Ebdon 1998).

2.5.2. ACEITE DE LINAZA

El aceite de linaza se obtiene de la semilla de linaza es un triglicérido de éster de ácido graso y está compuesto por aproximadamente 53% de ácido linolénico, 18% de ácido oleico, 15% de ácido linoleico, 6% de ácido palmítico y 6% de ácido esteárico (Conte et al. 1979). El aceite de linaza se polimeriza por polimerización catiónica, térmica, por radicales libres, así como por polimerización oxidativa (Meneghetti et al. 1998). Se utiliza tradicionalmente como un aceite de secado para aplicaciones de revestimiento de superficies.

Durante el proceso de polimerización oxidativa los hidroperóxidos naturales se descomponen para formar radicales libres, este paso puede catalizarse mediante la inclusión de secadores (catalizadores) o la aplicación de calor, por ejemplo, el cobalto, el plomo, y el circonio 2 etilhexanoato son usados generalmente como catalizadores para la polimerización oxidativa del aceite de linaza; el cobalto actúa durante el paso a la oxidación, los catalizadores de plomo y circonio actúan durante el paso de polimerización; el complejo de cobalto – circonio puede dar los mejores resultados, y bajo condiciones específicas el catalizador de circonio puede ser más eficiente que el plomo; los catalizadores de cobalto aceleraran todas las reacciones de oxidación involucradas en el proceso y mejoraron la formación de una película sólida en la superficie pero queda un aceite viscoso debajo de esta película superficial (Sharma and Kundu 2006).

3. PROCESO EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALES

La Figura 34 muestra las fibras piassaba de *Aphandra natalia* proporcionadas por los fabricantes de escobas de la ciudad de Loja – Ecuador. La Figura 35a muestra el cemento Portland Tipo II proporcionado por “UNACEM Ecuador”, la Tabla 3 muestra su composición química. La Figura 35b muestra los áridos finos disponibles en los mercados de la localidad, la Tabla 4 muestra su granulometría y el módulo de finura, este corresponde a 2.8 dentro del rango admisible para agregados finos de acuerdo a la Norma ASTM C33 (ASTM 1999), donde se especifica que el módulo no debe ser inferior a 2,3 ni superior a 3,1. La Figura 36 muestra los materiales cementantes suplementarios (SCM): la ceniza de cáscara de arroz (RHA) y el polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF) fueron obtenidos en laboratorio, en cambio el humo de sílice (SF) fue proporcionado por “Sika Ecuatoriana S.A”. La Figura 37 muestra las sustancias adherentes: “Industrias IMSSA” proporcionó el látex natural extraído de los árboles de caucho (*Hevea brasiliensis*), por otro lado, el aceite de linaza refinado corresponde al empleado para el tratamiento de la madera y la pintura artística al óleo, disponible en los mercados de la localidad. DISENSA proporcionó el hidróxido de calcio “INDAMICAL PREMIUN”. “Solvesa Ecuador S.A” proporcionó el hidróxido de sodio de 98% de pureza.

Figura 34. Fardo de Fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Fotografía del autor)

Figura 35. Cemento Portland y Áridos finos: (a) Cemento “Campeón HS” Tipo II, y (b) Agregados finos “Polucir”.

(Fotografías del autor)

Figura 36. Materiales cementantes suplementarios (SCM): (a) Ceniza de cáscara de arroz (RHA), (b) Humo de sílice (SF), y (c) Polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF).

(Fotografías del autor)

Figura 37. Sustancias adherentes: (a) Látex natural, y (b) Aceite de linaza.

(Fotografías del autor)

Tabla 3. Composición química del cemento Portland Tipo II.

Composición química (% en masa)	Cemento Portland Tipo II
Óxido de Sílice (SiO_2)	22.70
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	8.40
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	6.02
Óxido de Calcio (CaO)	45.70
Óxido de Potasio (K_2O)	0.89

Tabla 4. Granulometría de los áridos finos.

Malla	Peso Tamiz + Muestra	Peso Tamiz (g)	Peso Muestra (g)	Peso Muestra (%)	Acumulado	Retenido acumulado
8	477.1	477.1	0.0	0.0	0.0	100.0
16	445.7	422.4	23.2	8.8	8.8	91.2
30	469.9	399.9	70.0	26.5	35.3	64.7
50	446.3	371.9	74.4	28.1	63.4	36.6
100	358.7	310.0	48.8	18.5	81.9	18.1
200	536.2	511.8	24.4	9.2	91.1	8.9
Desclasificados	399.5	376.0	23.5	8.9	100.0	0.0
Módulo de finura	2.8					
Tamaño medio de partícula	0.45 mm					

3.1.1. RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL POLVO FINO DE MORTERO RECICLADO CALCINADO

En la [Figura 38](#) se muestra el proceso de obtención del polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF), se lo obtuvo de acuerdo al proceso de (Aguirre-Maldonado and Hernández-Olivares 2017). La materia prima provino del proceso de demolición de edificaciones con deterioros. La muestra se secó para proceder con dos etapas de trituración y una de pulverización, la primera etapa de trituración se realizó manualmente para liberar el agregado grueso de las muestras de hormigón, posteriormente se realizó la trituración mecánica con un molinillo, para finalmente utilizar un pulverizador de discos. Luego se separaron parte de los compuestos arenosos, aproximadamente 20%, para obtener una materia prima más fina. Posteriormente, se siguieron procesos de deshidratación a una temperatura de 800 ° C por 2 horas, después las muestras se enfriaron rápidamente y se colocaron en recipientes herméticos para almacenarlas en un ambiente seco.

Figura 38. Proceso de obtención de BRMF: (a) Primera etapa de tritución realizada manualmente con el propósito de librar el agregado grueso de las muestras de hormigón, (b) Trituración mecánica en un molino de bolas de marca MIM (Metal Industria Morocho), (c y d) Trituración con pulverizador de discos Molino de discos vibratorio RS 200, (e) Control de peso de muestras con una balanza precisión Mettler Toledo MS3002TS/00, y (f) Deshidratación de las muestras a una temperatura de 800°C bajo dos horas en un rango de 5°C/min en una mufla de serie LN/3 35/90.

(Fotografías del autor)

3.1.2. RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ

La Figura 39 muestra el proceso de obtención de las cenizas de cáscara de arroz (RHA). La cáscara de arroz provino del cantón Macará, provincia de Loja, Ecuador, en primer lugar, se quemó la cáscara de arroz durante 30 minutos en una hornilla eléctrica, la ceniza obtenida fue molida con un mortero cerámico durante 5 minutos, posteriormente la ceniza fue tratada térmicamente en una mufla programada a 500 °C por 2 horas obteniéndose RHA rica en sílice.

Figura 39. Proceso de obtención de RHA:(a) Cáscara de arroz (RH), (b) Calcinación en una hornilla eléctrica por 30 minutos, (c) RHA poco reactiva y con poco contenido de CO, (d y e) molienda de la RHA poco reactiva en un mortero cerámico durante 5 minutos, (f) RHA poco reactiva fina, y (g y h) Activación de la RHA a 500°C por 2 horas en una mufla de serie LN/3 35/90.

(Fotografías del autor)

3.2. TRATAMIENTOS SOBRE LAS FIBRAS NATURALES

3.2.1. TRATAMIENTO ALCALINO

La Figura 40 muestra el procedimiento del tratamiento alcalino aplicado a las fibras, se preparó una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentrada al 5% en agua destilada, se dejó reposar la solución por 24 de horas, seguido, se insertaron las fibras en la solución por 24 horas, al retirarlas se dejaron secar a temperatura ambiente.

Figura 40. Tratamiento alcalino de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Agua destilada e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (b) Solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentrada al 5% en agua destilada, (c) Fibras piassaba en la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ después de 24 horas, y (d) Fibras piassaba enjuagadas en agua destilada, después de la exposición alcalina, seguido, se dejaron secar a temperatura ambiente.

(Fotografías del autor)

3.2.2. COMBINACIONES DE AGENTES HIDRÓFUGOS CON MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS

En primer lugar, cada fibra se sumergió en una de las soluciones adherentes durante 5 segundos, en ésta etapa, la solución adherente rodea la fibra generando una capa de unión, después se utilizaron SCM como agentes de revestimiento. Con la finalidad de evaluar la efectividad de los tratamientos se insertó en el mortero fibras sin tratar (F - Sin tratar) y fibras tratadas con hidróxido de calcio (T - Ca(OH)_2). Las diferentes combinaciones se muestran en la [Tabla 5](#) y en la [Figura 41](#).

Tabla 5. Tratamientos aplicados a las fibras.

Nomenclatura	Tratamiento alcalino	Solución adherente	Revestimiento (SCM)	Detalles
F – Sin_Treatar	-	-	-	Fibras sin tratar.
T- Ca(OH)_2	Hidróxido de Calcio	-	-	Se preparó una solución de Ca(OH)_2 concentrada al 5% en agua destilada. Se dejó la solución en reposo por 24 de horas, seguido, se insertaron las fibras en la solución por 24 horas, al retirarlas, se dejaron secar a temperatura ambiente.
NRL–RHA	-	Látex natural	Ceniza de cáscara de arroz	Se insertan las fibras en el polímero durante 5 segundos, posteriormente se impregnaron con los SCM.
NRL–SF	-	Látex natural	Humo de Sílice	Se empleó el mismo procedimiento que NRL – RHA.
NRL–BRMF	-	Látex natural	Polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado	Se empleó el mismo procedimiento que NRL – RHA.
LO–RHA	-	Aceite de linaza	Ceniza de cáscara de arroz	Se insertan las fibras en el aceite durante 5 segundos, posteriormente se impregnaron con los SCM. No se empleó tratamiento térmico para acelerar la polimerización del aceite.
LO–SF	-	Aceite de linaza	Humo de sílice	Se empleó el mismo procedimiento que LO – RHA.
LO–BRMF	-	Aceite de linaza	Polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado	Se empleó el mismo procedimiento que LO – RHA.

Figura 41. Tratamientos combinados entre soluciones adherente y SCM: (a) Látex natural- RHA, (b) Látex natural- SF, (c) Látex natural- BRMF, (d) Aceite de linaza- RHA, (e) Aceite de linaza- SF, y (f) Aceite de linaza- BRMF.

(Fotografías del autor)

3.3. ENSAYOS SOBRE LAS FIBRAS PIASSABA DE APHANDRA NATALIA

3.3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

Se cortaron las fibras en longitudes inferiores a 1cm (Figura 42a), después se colocaron en cápsulas de porcelana, previamente se esterilizaron dejándolas libres de materiales extraños o restos de humedad. Las cápsulas fueron colocadas en una estufa “Member” de convección forzada previamente calibrada a 105 °C durante una hora para eliminar restos de humedad (Figura 42b). Posteriormente se colocaron en un desecador de laboratorio de vidrio durante una hora para estabilizar a temperatura ambiente (Figura 42d), y determinar su peso seco en una balanza analítica “Mettler AC100 Digital” con aproximación a 0.1 mg (Figura 42c). El procedimiento se repitió hasta que exista una diferencia menor a 0.002 g entre la última medición y la anterior.

El porcentaje de humedad que contiene la fibra se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{w_f - w_i}{w} * 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde “wi” es el peso inicial de la fibra con la cápsula, “wf” es el peso final de la fibra con la cápsula, y “w” es el peso de la fibra.

Figura 42. Determinación del contenido de humedad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Fibras piassaba en longitudes inferiores a 1cm, (b) Estufa “Member” de convección forzada, y (c) Balanza analítica “Mettler AC100 Digital” con aproximación a 0,1 mg, y (d) Desecador de laboratorio de vidrio.

(Fotografías del autor)

3.3.2. ABSORCIÓN DE AGUA

Para la medición del porcentaje de absorción de humedad se consideró una muestra de 30 haces de fibra cortadas en diferentes longitudes para su reconocimiento (Figura 43). Estas fueron pesadas individualmente en una balanza analítica “Mettler AC100 Digital” con aproximación a 0.1 mg, posteriormente se sumergieron en agua destilada (pH~6.25) durante 24 horas, para ser pesados nuevamente y registrar su peso en el punto de saturación, para realizar esta medición se retiró el agua adherida sobre la superficie de los paquetes de fibra utilizando una tela absorbente.

Para calcular el porcentaje de absorción se empleó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ absorción} = \frac{w_h - w_s}{w_h} * 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde “wh” es el peso en gramos de la fibra en humedad ambiente (60% humedad relativa) y, “ws” es el peso en gramos en el punto de saturación de la fibra.

Figura 43. Determinación de la absorción de agua de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Fibras en longitudes de 2cm, 3cm, y 4cm, y (b) Fibras sumergidas en agua destilada en viales de plástico.

(Fotografías del autor)

Figura 44. Determinación de la densidad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Paquete de 10 fibras, cada paquete tiene una longitud de 5 cm, y (b) Materiales e instrumentos necesarios para el ensayo.

(Fotografías del autor)

3.3.3. DENSIDAD

La densidad aparente de las fibras se calculó mediante el método de desplazamiento de volumen. Se obtuvo la densidad de las fibras a partir de 10 pequeños paquetes de fibras de 5 cm de longitud bajo humedad ambiente (contenido de humedad de las fibras igual a 12.63%), y tras 24 horas de saturación en agua destilada (contenido de humedad de las fibras igual a 18.35 %). Cada paquete de fibras se conformó por 10 fibras individuales de piassaba de 5 cm de longitud. Cada paquete de fibras fue asegurado por dos nudos hechas por propias fibras más finas (Figura 44a). Para el ensayo fue necesario, además, del agua destilada y los paquetes de fibras, una balanza electrónica de 0.001g de precisión, un soporte universal, y una probeta de 100 ml (Figura 44b).

Para calcular la densidad se empleó la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_e} * \rho_a \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde “ ρ_s ” es la densidad del haz de fibras, “ m_s ” es la masa del paquete de fibras, “ m_e ” es la masa del agua destilada desalojada y, “ ρ_a ” es la densidad del agua destilada.

3.3.4. GROSOR

El histograma de frecuencias en relación al grosor de las fibras se construyó a partir de 205 fibras tomadas aleatoriamente de un fardo de fibras. Cada fibra fue medida en 5 puntos diferentes a lo largo de su longitud en relación a su grosor o medida más de la sección transversal de las fibras, se empleó un micrómetro de 0.01 mm de precisión. Las mediciones obtenidas fueron ordenadas en 6 intervalos mediante un software estadístico (Minitab). La Figura 45 muestra el instrumento de medición y una de las fibras analizadas.

Figura 45. Determinación del grosor de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Micrómetro Digital FUJISAN 0-25mm/0.001mm, y (b) Fibra piassaba de 27 cm de longitud.

(Fotografías del autor)

3.3.5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

El esfuerzo último a la tensión se calculó a través de la relación carga de falla y el área de la sección transversal de la fibra en el plano de fractura. La carga se aplicó gradualmente y se midió con un dinamómetro de 50 N. La longitud inicial entre mordaza fue de $20 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$. Cada fibra fue marcada en dos puntos con cinta adhesiva, lo que permitió obtener alargamiento de la longitud de referencia (se empleó un calibrador de 0.01 mm de precisión). Después de la prueba a tracción mediante microscopía óptica y con ayuda de un programa informático de dibujo se obtuvo el perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura, esto se ilustra desde la [Figura 99](#) hasta la [Figura 104](#). Para cada intervalo de grosor se usaron los datos de 10 experimentos en los que se midió el límite elástico y la deformación hasta ese punto, así como la carga y deformación de rotura. La [Figura 46](#) esquematiza el dispositivo de prueba y la [Figura 47](#) muestra el mecanismo construido. La resistencia a la tracción, módulo de Young, y deformación de rotura se calcularon con las Ecuaciones 14, 15, y 16 respectivamente.

$$\sigma = \frac{L}{A} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \times 0.001 \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\epsilon\% = \frac{\Delta l}{l} \times 100 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde “ σ ” es la resistencia a la tracción de la fibra en Megapascal (MPa), “L” es la carga máxima en Newtons (N), “A” es el área de la sección transversal de la fibra en el plano de fractura en milímetros cuadrados (mm²), “E” es el módulo de elasticidad en Gigapascal (GPa). “ σ_y ” es el límite de fluencia en MPa, y “ ϵ_y ” es la deformación unitaria hasta el límite de fluencia, ambos valores obtenidos de la gráfica tensión deformación. “ $\epsilon\%$ ” es la deformación de rotura, “ Δl ” es el alargamiento de la longitud de referencia en milímetros (mm), y “l” es la longitud de referencia inicial o longitud de calibre (20 mm).

Los valores obtenidos, se interpretaron estadísticamente por medio de un programa de ordenador de análisis Weibull (Minitab), para obtener la función de forma se emplearon los parámetros Weibull de la media de la resistencia a la tracción y la media del módulo de Young, y se correlacionaron con la media del grosor (Figura 93), y la media del área de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción (Figura 94).

Figura 46. Esquema de la prueba a la tracción realizada a la fibras de piassaba de *Aphandra natalia*.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 47. Mecanismo de prueba a la tracción para ensayar las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Fotografías del autor)

3.3.6. DEGRADACIÓN EN MEDIOS ALCALINOS

De acuerdo con el procedimiento de (Jose et al. 2017) se simuló la degradación de las fibras que puede ocurrir en el mortero durante el tiempo de curado. Se utilizó una solución de hidróxido de sodio concentrado al 1.7% con PH similar a la de los compuestos de cemento (pH~12.4). Se sumergieron fibras tratadas y sin tratar en la solución alcalina por 98 días y se pesaron cada 7 días. Se realizaron las mediciones con la balanza analítica “OHAUS DV214C, 210g/ 0.1mg” (Figura 48d).

Tres fibras de diferente longitud para poder ser identificadas y para cada tratamiento fueron sumergidas en una solución de hidróxido de sodio (Figura 48a), y separadas en recipientes de vidrio independientes hasta el día de pesaje (Figura 48b). Antes de pesarlas, fibra por fibra, fueron lavadas con el máximo cuidado en agua destilada y se secaron superficialmente con un paño seco y limpio (Figura 48c), luego se colocaron en recipientes plásticos vacíos e independientes hasta pesarlas. Después de haber pesado cada una de las fibras, nuevamente se aplicaron los respectivos tratamientos, para finalmente, colocarles en la solución de hidróxido de sodio hasta la próxima pesa. Al emplearse una balanza muy sensible, el procedimiento para tomar la medida, fibra por fibra, se repitió hasta que exista una diferencia menor a 0.002 g entre la última medición y la anterior (Figura 48d).

Figura 48. Determinación de la pérdida de masa de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en medios alcalinos: (a) Hidróxido de sodio para una solución concentrada al 1.7% en agua destilada, (b) Recipientes de vidrio para inmersión de las fibras con y sin tratamiento hasta ser pesadas, también se muestran, las soluciones adherentes y los SCM, además de las fibras de diferentes longitudes para su identificación, (c) Agua destilada para lavar las fibras y desprender los tratamientos, también se aprecian los paños para secar superficialmente las fibras, y los recipientes plásticos para contener las fibras hasta ser pesadas, y (d) Balanza OHAUS DV214C, 210g/ 0.1mg, y recipientes plásticos para contener las fibras después lavado, durante la medición, y antes de aplicar nuevamente los tratamientos

(Fotografías del autor)

3.3.7. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Para observar la morfología de las fibras piassaba se empleó un microscopio electrónico “Andonstar V160” (Figura 49d). Las fibras fueron preparadas para observar la sección transversal y la superficie de piassaba en estado natural (Figura 49a), también para observar la sección transversal de las fibras en los morteros después de ser ensayados a tracción (Figura 49b), y para observar la superficie de las fibras retiradas de los morteros después de ser ensayados a tracción (Figura 49c).

Figura 49. Observación de la sección transversal y superficie de piassaba de *Aphandra natalia*, y observación de los daños sufridos sobre la superficie y la sección transversal de las fibras por la alcalinidad del mortero: (a) Muestra de fibras preparadas para la observación de la sección transversal de piassaba en estado natural, (b) Probeta de mortero después de ser ensayada a tracción para observar los efectos de la alcalinidad sobre la sección transversal de las fibras, (c) Muestras de fibras en estado natural y retiradas de los morteros ensayados a tracción para observar los efectos de la alcalinidad sobre sus superficies, y (d) Funcionamiento del microscopio electrónico “Andonstar V160”.

(Fotografías del autor)

3.3.8. MICROSCOPIA SEM

Antes del estudio, se recubrieron las fibras con paladio mediante pulverización catódica. A continuación, se analizó la morfología con un microscopio electrónico de barrido "Nova NanoSEM 450" (Figura 50).

Figura 50. Procedimiento para el estudio de la morfología de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* sin tratar y tratadas alcalinamente: (a, b y c) Recubrimiento de las fibras con paladio mediante pulverización catódica, y (d) Microscopio electrónico de barrido "Nova NanoSEM 450".

(Fotografías del autor)

3.4. ENSAYOS SOBRE LOS MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS (SCM)

3.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se estudió la composición química del cemento Portland de los SCM a través de espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), con el analizador portátil de XRF "S1 TITAN modelo 800" (Figura 51). Los resultados del cemento Portland se muestran en la Tabla 3 del apartado 3.1 de materiales.

Figura 51. Instrumentos empleados para el estudio de los componentes químicos de los SCM: (a y b) Analizador portátil de XRF "S1 TITAN modelo 800".

(Fotografías del autor)

3.4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

Para observar la morfología de las partículas de los SCM, se empleó un microscopio óptico binocular Compuesto “Amscope” (Figura 52).

Figura 52. Instrumentos empleados para estudiar la morfología de los SCM:(a y b) Microscopio Binocular Compuesto “Amscope”.

(Fotografías del autor)

3.4.3. TAMAÑO DE PARTÍCULA

El análisis del tamaño de partícula de los SCM se lo efectuó por tamizado. Este método de ensayo se utilizó principalmente para determinar la graduación de SCM con el propósito de utilizarlos como áridos o finos en morteros y estimar el arreglo de las partículas en la matriz de cemento.

En la Tabla 6 y en la Figura 53a se muestran los tamices seleccionados y disponibles en el laboratorio de mineralogía de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Los tamices se ordenaron en forma decreciente según el tamaño de su abertura de arriba a abajo y se colocaron las muestras de SCM en el tamiz superior. Se ensayaron en promedio 35 g de SCM, es decir, toda la materia prima disponible. Los tamices se agitaron mecánicamente (Figura 53b) por 10 minutos. Las masas de las muestras fueron medidas en una balanza “OHAUS DV214C, 210g/ 0.1mg”.

Tabla 6. Equivalencias aceptadas entre los tamaños nominales de las aberturas dadas en la norma INEN y las de la serie ASTM para las mallas de alambre.

INEN Abertura indicada	ASTM Designación
500 um	35
355 um	45
250 um	60
212 um	70
125 um	120
75 um	200
63 um	230
45 um	325
38 um	400

Figura 53. Instrumentos empleados para el análisis de tamaño de partícula de los SCM: (a) Serie de tamices empleados, y (b) Tamices agitados mecánicamente.

(Fotografías del autor)

3.4.4. pH DE LA SOLUCIÓN AGUA- CEMENTO Y DE LAS SOLUCIONES AGUA – CEMENTO – SCM

Se experimentó con una variación del método de lixiviación ex – situ (ESL) similar al proceso empleado por (Manso, S and Aguado 2017). La relación sólido – líquido (S:L) fue de 1:10 (Tabla 7). Se utilizó agua desionizada y como sólidos, por un lado, cemento Portland (Figura 54a) y, por otro lado, combinaciones de cemento (PC) con materiales cementantes suplementarios (SCM) como el humo de sílice (SF), la ceniza de cáscara de arroz (RHA), y el polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF). Se experimentó con sustituciones de cemento del 30% en peso por SF (Figura 54b), RHA (Figura 54c), y BRMF (Figura 54d), especialmente en relación a investigaciones de materiales compuestos a base de cemento reforzados con fibra vegetales (Wei and Meyer 2015, 2016, 2017). La solución se agitó vigorosamente durante 5 minutos (Figura 54e). Finalmente se midió el pH con un pHmetro manual testo 206-ph2 (Figura 54f). Las mediciones se efectuaron a 1 hora, 1 día, 7 días, 14 días, 21 días, y 28 días.

Tabla 7. Relaciones de las soluciones acuosas para la medición del pH.

	Relación sólido- líquido (S:L)	Cemento (g)	SCM (g)	Agua (ml)	Agua (g)
Agua + PC	1: 10	4	-	40	40
Agua + PC – SF 30%	1: 10	2.8	1.2	40	40
Agua + PC – RHA 30%	1: 10	2.8	1.2	40	40
Agua + PC – BRMF 30%	1: 10	2.8	1.2	40	40

Figura 54. Determinación del pH de la solución agua – cemento, y de las soluciones agua – cemento – SCM al 30% de sustitución del cemento: (a) Cemento Portland, (b) PC- SF30%, (c) PC-RHA30%, (d) PC-BRMF30%, (e) Solución de poros de las muestras PC- SCM, (f) pHmetro manual, testo 206-ph2.

(Fotografías del autor)

3.5. GRANULOMETRÍA DEL ÁRIDO USADO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MORTEROS.

La granulometría de los áridos empleados en la presente investigación fueron determinados de acuerdo a los criterios establecidos en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 696 (INEN 2011) referente al análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos. Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación de materiales con el propósito de utilizarlos como áridos para hormigón.

Primero la muestra fue secada hasta obtener masa constante a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ en un horno de banco para laboratorio “Humboldt H-30145” ([Figura 55b](#)). El tamaño de la muestra para el ensayo, luego de secarla, fue de 266.50 gramos. Las aberturas de los tamices seleccionados se determinaron de acuerdo a la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2536 (INEN 2010) referente para áridos de uso en morteros para mampostería. En la [Tabla 8](#) se detallan los tamices empleados, estos se agitaron por 15 minutos con un cribador para tamices “Ro- Tap, Testing Sieve Shaker/ Model B” ([Figura 55d](#)). Las masas fueron determinadas en una balanza “SHS inside super hybrid sensor FX-5000” de precisión 0.01g ([Figura 55c](#)). Finalmente se calcularon los porcentajes pasantes, los porcentajes retenidos totales o porcentajes en fracciones de varios tamaños y el módulo de finura.

Los resultados se muestran en la [Tabla 4](#) del apartado 3.1 de materiales.

Tabla 8. Equivalencias aceptadas entre los tamaños nominales de las aberturas dadas en la norma INEN y las de la serie ASTM para las mallas de alambre.

INEN Abertura indicada	ASTM Designación
2.36 mm	8
1.18 mm	16
600 μ m	30
300 μ m	50
150 μ m	100
75 μ m	200

Figura 55. Determinación de la granulometría de los áridos empleados para la elaboración de los morteros de cemento Portland: (a) Muestra del árido en humedad ambiente, (b) Secado de la muestra con un horno de banco para laboratorio “Humboldt H-30145”, (c) Determinación de masas con una balanza “SHS inside super hybrid sensor FX-5000” de precisión 0.01 g, (d) Agitado de las muestras con un cribador para tamices “Ro- Tap, Testing Sieve Shaker/ Model B”.

(Fotografías del autor)

3.6. PREPARACIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO PORTLAND PARA PRUEBAS DE FLEXIÓN CON FIBRAS ORDENADAS LONGITUDINALMENTE

Se preparó un mortero dosificado en peso 1:5 común en morteros de albañilería, y relación agua/cemento 0.6 para evitar la adición de reductores de agua por inclusión de las fibras y los SCM. Se mezcló el cemento y el agua a baja velocidad durante 5 minutos, después se incorporó el árido y se mezcló durante 5 minutos más (Figura 57a). En los moldes de 40 mm x 40 mm x 160 mm se colocó y compactó por capas la pasta fresca de cemento (Figuras 57b y 57c), y 170 fibras (0.9585 g) equivalente a una inclusión de fibra del 0.3% en relación al peso, estas fibras se ordenaron una por una en la mezcla fresca como se muestra en la Figura 56. Se desmoldaron las probetas después de 24 horas y se curaron en agua durante 28 días (Figura 57d). Las fibras incorporadas fueron sin tratar, tratadas alcalinamente, recubiertas con combinaciones de agentes hidrófugos y materiales cementantes suplementarios como se especifica en la Tabla 5.

Figura 56. Disposición longitudinal de las fibras en las probetas de mortero: (a) vista en sección de planta, y (b) vista en sección transversal.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 57. Elaboración y curado de las probetas: (a) Mezcla, (b y c) Colocación y compactación de la mezcla en moldes, y (d) Curado del mortero fibroso por 28 días.

(Fotografías del autor)

3.7. ENSAYOS SOBRE LOS MORTEROS ENDURECIDOS

Se ensayaron morteros fibrosos a los 28 días de curado. Los ensayos mecánicos de los morteros se realizaron sobre probetas de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Después de los ensayos de resistencia a la flexión las probetas de mortero fibroso fueron divididas en dos partes, las fibras expuestas en el punto de fractura fueron separadas del hormigón y observadas mediante microscopia electrónica, mientras que una de las partes de las probetas fue usada para determinar las propiedades físicas, la otra fue triturada para obtener el valor del pH de la solución de poros.

3.7.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

En la Figura 59 se muestran los materiales e instrumentos necesarios para determinar las propiedades físicas de los morteros endurecidos. Se realizaron las siguientes pruebas: absorción de agua, porosidad y densidad según la norma UNE 83980 (Asociación Española de Normalización y Certificación 2014), capilaridad según la norma UNE-EN 1015-18 (Asociación Española de Normalización y Certificación 2003).

Para iniciar el estudio de la porosidad y densidad de los morteros, primero se pesaron las probetas en estado natural (M_{nat}), después se secaron a 110 °C por tres horas hasta obtener masa constante. Una vez secas las muestras se las dejó enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente, se registró el peso seco (M_o) y se introdujeron en un tanque hasta quedar completamente sumergidas y cubiertas por dos centímetros de agua y separadas del fondo del recipiente por 24 horas (Figuras 58a y 58b), conociéndose así el peso

saturado (M_{sat}). Finalmente, el peso sumergido de las probetas (M_{sum}) se lo obtuvo aplicando el principio de Arquímedes. Para los cálculos se emplearon las siguientes ecuaciones:

Volumen aparente (V_a):

$$V_a \text{ (cm}^3\text{)} = \frac{M_{sat} - M_{sum}}{\rho \text{ fluido desplazado}} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Densidad aparente (ρ_o):

$$\rho_o \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_o}{V_a} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Volumen de poros abiertos (V_{pa}):

$$V_{pa} \text{ (cm}^3\text{)} = \frac{M_{sat} - M_o}{\rho \text{ fluido desplazado}} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Porosidad abierta (β):

$$\beta \text{ (\%)} = \frac{V_{pa}}{V_a} \times 100 \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Al mismo tiempo se estudió la capilaridad. Se secaron las probetas a 110 °C por tres horas. Una vez secas, se dejaron enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente, se registró el peso seco (M_o), y se midió la superficie de contacto con el agua de cada una de las probetas (A_s). Las muestras se colocaron sobre un soporte de tal forma que no estén en contacto con el fondo del recipiente. El tanque se llenó con agua hasta alcanzar una altura de 5 mm en las probetas (Figuras 58c y 58d). Finalmente se extrajeron las probetas y se registró el peso a intervalos de tiempo de 3, 5, 10, 15, 20, 40 y 60 minutos.

Para los cálculos se emplearon las siguientes ecuaciones:

Coeficiente de absorción de agua por capilaridad (Cct):

$$Cct \left(\frac{g}{cm^2 * h^{0,5}} \right) = \frac{M_t - M_o}{A_s * \sqrt{t}} \text{ o } Cct = \frac{\Delta M}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Incremento de la masa en función del área (ΔM):

$$\Delta M (g/cm^2) = \frac{M_t - M_o}{A_s} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Figura 58. Desarrollo de ensayos para determinar las propiedades físicas de los morteros endurecidos:

(a y b) Pruebas de absorción de agua por inmersión, y (c) Pruebas de absorción de agua por capilaridad.

(Fotografías del autor)

Figura 59. Materiales e instrumentos necesarios para determinar las propiedades físicas de los morteros endurecidos: (a) Probetas de mortero endurecido, agua destilada (para pruebas de densidad), soporte universal, y balanza de laboratorio “US Solid 500x0.001g 1 mg”, y (b) Horno eléctrico de secado.

(Fotografías del autor)

3.7.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

La resistencia a la flexión fue determinada bajo la norma EN 12390-5 (EN 2009). Se utilizó la máquina de prueba universal "SHIMADZU" a una velocidad de tensión de 0.8 mm/min (Figura 60). Por último, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

Resistencia a la flexión:

$$\sigma_f = \frac{3*F*L}{2*b*h^2} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{L^3*F}{4*b*h^3*f} * 0.001 \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde σ_f es la resistencia a la flexión (MPa), F es la carga máxima (N), L es el espacio entre los soportes en la prueba de flexión de tres puntos (mm), E es el módulo elástico (GPa), b y h son el ancho y el espesor de la probeta (mm), f es la flecha Máxima en el centro de la muestra.

Figura 60. Desarrollo de ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los morteros endurecidos: (a) Preparación de las muestras antes de ser ensayadas, (b) Probetas en posición para iniciar el ensayo, (c) Máquina de prueba universal "SHIMADZU CONCRETE 2000X", y (d) Software de prueba de materiales "TRAPEZIUM X".

(Fotografías del autor)

3.7.3. pH DE LA SOLUCIÓN DE POROS

Se experimentó con una variación del método de lixiviación ex-situ (ESL), similar al proceso empleado por (Manso, S and Aguado 2017). La relación sólido – líquido (S: L) fue de 1:10. Se utilizó agua desionizada y como sólidos el polvo resultado de la trituración de las probetas ensayadas a flexión: morteros con fibras, sin fibras, y recubiertas con diferentes combinaciones a base de agentes hidrófugos – SCM (Figuras 61a, 61b, y 61c). La solución se agitó vigorosamente durante 5 minutos. Finalmente se midió el pH con un pHmetro manual testo 206-ph2 (Figura 61d). Las mediciones se efectuaron a 1 hora, 1 día, 7 días, 14 días, 21 días, y 28 días.

Figura 61. Determinación del pH de la solución de poros de los polvos de morteros reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Morteros con fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y con diferentes recubrimientos a base de agentes hidrófugos – SCM, (b y c) Polvo de mortero triturado de cada muestra, y (d) Medición del pH con pHmetro manual testo 206-ph2.

(Fotografías del autor)

4. RESULTADOS

4.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PIASSABA DE *APHANDRA NATALIA*

4.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

En la [Tabla 9](#) se muestra el contenido de humedad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*. El contenido de humedad de las fibras es relativamente similar al de otras fibras vegetales empleadas para desarrollar materiales compuestos (12.67%), por ejemplo: fibras de lino, yute, y fique (11.5%, 12.5%, y 13.2% respectivamente) (Moreno Montoya, Trujillo de los Ríos, and Osorio Serna 2007), fibras de bagazo de caña de azúcar (11,67%) (Vega-Baudrit et al. 2008), fibras de hierva de elefante (13.9%) (Ridzuan et al. 2016), y fibras de piña (13.5%) (Salvador et al. 2008). Según (Moreno et al. 2007) a menor porcentaje de contenido de humedad mayor posibilidad de adherencia entre el refuerzo y la matriz y mayor estabilidad dimensional. Es decir, piassaba de *Aphandra natalia* podría presentar condiciones similares de adherencia que otras fibras vegetales comúnmente empleadas como refuerzos secundarios o estructurales en materiales de construcción.

Tabla 9. Contenido de humedad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

Muestras	Peso inicial de la fibra con la cápsula (wi) (g)	Peso final de la fibra con la cápsula (wf) (g)	Peso final de la fibra (w) (g)	Contenido de humedad (% humedad)	Contenido de humedad (Promedio) (% humedad)	Desviación estándar
1	49.2440	49.2407	1.1816	12.6912	12.6279	± 0.0636
2	92.5216	92.5176	1.2122	12.5639		
3	51.9169	51.9144	1.1832	12.6287		

4.1.2. ABSORCIÓN DE AGUA

En la Tabla 10 se muestra el porcentaje de absorción de agua de piassaba de *Aphandra natalia* el valor es de 22.6%, inferior al reportado de otras fibras vegetales, por ejemplo, las fibras de *Guadua Angustifolia* (45.88 %) (Moreno et al.2007).

Tabla 10.Absorción de agua de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

Muestras	Masa del sólido en humedad ambiente (wh) (g)	Masa del sólido en punto de saturación (ws) (g)	Absorción de agua (% absorción) (%)	Absorción de agua (Promedio) (% absorción) (%)	Desviación estándar $\pm$
1	0.00537	0.00645	20.11173		
2	0.00509	0.00599	17.68173		
3	0.00792	0.00983	24.11616		
4	0.00514	0.00613	19.26070		
5	0.00421	0.00489	16.15202		
6	0.00454	0.00536	18.06167		
7	0.00809	0.00977	20.76638		
8	0.00610	0.00742	21.63934		
9	0.00877	0.01088	24.05929		
10	0.00781	0.00947	21.25480		
11	0.01098	0.01326	20.76503		
12	0.01512	0.01962	29.76190		
13	0.01148	0.01402	22.12544		
14	0.01040	0.01268	21.92308		
15	0.01090	0.01332	22.20183		
16	0.01428	0.01934	35.43417	22.62	4.06
17	0.00958	0.01164	21.50313		
18	0.01504	0.01872	24.46809		
19	0.00911	0.01099	20.63666		
20	0.01049	0.01236	17.82650		
21	0.01268	0.01550	22.23975		
22	0.00861	0.01077	25.08711		
23	0.02136	0.02779	30.10300		
24	0.01311	0.01599	21.96796		
25	0.02470	0.03075	24.49393		
26	0.01433	0.01783	24.42428		
27	0.01416	0.01678	18.50282		
28	0.02472	0.02977	20.42880		
29	0.01375	0.01740	26.54545		
30	0.02330	0.02913	25.02146		

4.1.3. DENSIDAD

En las Tablas 11 y 12 se muestran las densidades de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* correspondientes a paquetes de fibras con contenidos de humedad de 12.63% (natural a temperatura ambiente) y 22.62% (saturada en agua destilada). En la Figura 62a se aprecia un paquete de fibras con contenido de humedad de 12.63%, y en la Figura 62b se observa un paquete de fibras saturadas en agua destilada. Las fibras con contenido de humedad de 12.63% presentan baja densidad (0.94 g/cm³), comparable con fibras sintéticas como las de polietileno (0.96 g/cm³) (He et al. 2017), y polipropileno (0.9 g/cm³) (Felekoğlu, Tosun, and Baradan 2009); y comparable con las densidades de otras fibras vegetales, por ejemplo, las de hoja de sansevieria, las de cáscara de coco, las de hoja de abacá, y las de hoja de sisal (0.89 g/cm³, 0.87 g/cm³, 0.83 g/cm³, 0.76 g/cm³ respectivamente) (Munawar, Umemura, and Kawai 2007). Por otro lado, las fibras saturadas con agua destilada, presentan una densidad de 1.16 g/cm³, inferior a las fibras sintéticas de vidrio (2.5 g/cm³) (Ilankeeran, Mohite, and Kamle 2012), y poliéster (1.4 g/cm³) (Rodríguez López and Prado Pérez-Seoane 1984). Por lo que son una buena opción para el desarrollo de productos ligeros.

Tabla 11. Densidad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* a temperatura ambiente (contenido de humedad de las fibras 12.63%).

Muestras	Masa del sólido (g)	Masa del vaso con agua (g)	Masa del vaso con agua más el sólido introducido (g)	Masa del agua desalojada (g)	Densidad del agua destilada (g/cm3)	Densidad del sólido (g/cm3)	Densidad del sólido (Promedio) (g/cm3)	Desviación estándar $\pm$
1	0.138	216.788	216.938	0.150	0.99795	0.91811		
2	0.115	216.698	216.818	0.120	0.99795	0.95637		
3	0.123	216.639	216.760	0.121	0.99795	1.01445		
4	0.107	216.573	216.687	0.114	0.99795	0.93667		
5	0.101	216.531	216.632	0.101	0.99795	0.99795	0.94297	0.0428
6	0.109	216.483	216.597	0.114	0.99795	0.95418		
7	0.070	216.417	216.494	0.077	0.99795	0.90723		
8	0.075	216.374	216.453	0.079	0.99795	0.94742		
9	0.059	216.312	216.380	0.068	0.99795	0.86587		
10	0.140	216.251	216.401	0.150	0.99795	0.93142		

Tabla 12. Densidad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* a temperatura ambiente (contenido de humedad de las fibras 22.62).

Muestra	Masa del sólido (g)	Masa del vaso con agua (g)	Masa del vaso con agua más el sólido introducido (g)	Masa del agua desalojada (g)	Densidad del agua destilada (g/cm3)	Densidad del sólido (g/cm3)	Densidad del sólido (Promedio) (g/cm3)	Desviación estándar
1	0.195	217.041	217.215	0.174	0.99795	1.11839		
2	0.187	216.971	217.14	0.169	0.99795	1.10424		
3	0.187	216.923	217.09	0.167	0.99795	1.11746		
4	0.163	216.878	217.015	0.137	0.99795	1.18734		
5	0.153	216.808	216.937	0.129	0.99795	1.18362		
6	0.155	216.748	216.883	0.135	0.99795	1.14579	1.16084	0.0489
7	0.108	216.598	216.687	0.089	0.99795	1.21100		
8	0.127	216.456	216.571	0.115	0.99795	1.10208		
9	0.093	216.649	216.726	0.077	0.99795	1.20532		
10	0.194	216.541	216.698	0.157	0.99795	1.23314

(Fotografías del autor)

4.1.4. ENSAYOS A TRACCION

En el presente estudio la fuerza de agarre de las mordazas sobre la superficie de las fibras fue el factor más crítico y difícil de calibrar. Se desarrollaron más de 200 ensayos a tracción de los cuales 60 fueron considerados en los resultados. En los ensayos considerados como fallidos las fibras dentro de un mismo rango de grosor presentaron diferencias significativas en la capacidad de soportar carga y una forma de falla comparable con el corte de una tijera, estas diferencias se debieron a la presión excesiva de agarre de las mordazas sobre la superficie de las fibras, estos se convirtieron en puntos críticos suficientemente débiles para permitir la falla sin que las fibras logaran su máximo rendimiento a tracción. De los ensayos desarrollados se destaca lo siguiente:

- (1) las fibras más finas requirieron menos fuerza de agarre que las fibras más gruesas,
- (2) una fuerza de agarre excesiva provocó daños sobre la superficie de la fibra, y (3)
- una fuerza de agarre insuficiente provocó el deslizamiento de las mordazas sobre la superficie de la fibra.

Desde la Tabla 13 hasta la Tabla 18 se muestran los valores de las características mecánicas en relación a seis rangos de grosores de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*. El número de datos obtenidos para cada rango de grosor fue de 10. Las gráficas y parámetros Weibull se obtuvieron con el software estadístico “Minitab”, y la Función de forma para la resistencia a la tracción y el módulo de Young en relación al grosor de la fibra y la el área en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción se obtuvieron con el software estadístico “Statgraphics”.

Tabla 13. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm ²)	Carga de rotura (L) (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura (ε%) (%)	Límite Elástico (σ _y) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ε _y)	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.10	0.0167	7.75	464.072	6.75	104.79	0.0070	14.9701
2	0.10	0.0151	8.25	546.358	6.45	115.89	0.0035	33.1126
3	0.10	0.0162	7.25	447.531	5.95	108.02	0.0045	24.0055
4	0.13	0.0248	13.75	554.435	5.25	70.56	0.0070	10.0806
5	0.13	0.0211	13.75	651.659	6.90	82.94	0.0040	20.7346
6	0.10	0.0180	7.75	430.556	5.25	97.22	0.0045	21.6049
7	0.10	0.0146	7.75	530.822	6.15	291.10	0.0175	16.6341
8	0.10	0.0113	6.75	597.345	6.75	376.11	0.0100	37.6106
9	0.10	0.0122	8.75	717.213	5.95	348.36	0.0150	23.2240
10	0.10	0.0119	8.25	693.277	7.90	357.14	0.0120	29.7619

Tabla 14. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.20 mm y 0.29 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm ²)	Carga de rotura (L) (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura (ε%) (%)	Límite Elástico (σ _y) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ε _y)	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.21	0.0425	19.75	464.706	5.80	111.76	0.0050	22.3529
2	0.20	0.0466	18.75	402.361	4.15	101.93	0.0050	20.3863
3	0.24	0.0897	20.75	231.327	5.30	52.95	0.0025	21.1817
4	0.26	0.1075	21.75	202.326	6.20	81.40	0.0035	23.2558
5	0.27	0.1195	25.75	215.481	9.50	73.22	0.0045	16.2715
6	0.24	0.1291	25.75	199.458	8.50	67.78	0.0055	12.3231
7	0.23	0.0776	19.75	254.510	4.50	112.76	0.0085	13.2656
8	0.27	0.1129	21.75	192.648	7.75	28.79	0.0025	11.5146
9	0.25	0.0994	21.75	218.813	6.50	88.03	0.0115	7.6546
10	0.20	0.0554	15.75	284.296	8.80	76.71	0.0115	6.6709

Tabla 15. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm ²)	Carga de rotura (L) (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura ($\epsilon\%$) (%)	Límite Elástico (σ_y) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ϵ_y)	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.33	0.1723	26.75	155.252	7.25	50.78	0.0085	5.9745
2	0.30	0.1379	14.75	106.962	4.60	63.45	0.0115	5.5175
3	0.30	0.0900	20.75	230.556	7.10	97.22	0.0140	6.9444
4	0.38	0.1636	24.75	151.284	7.15	84.05	0.0195	4.3101
5	0.36	0.1967	34.75	176.665	8.90	69.90	0.0040	17.4759
6	0.34	0.0858	34.75	405.012	8.80	218.53	0.0195	11.2067
7	0.30	0.1052	16.75	159.221	7.85	83.17	0.0140	5.9411
8	0.39	0.1387	30.25	218.097	6.80	27.76	0.0055	5.0469
9	0.38	0.1244	35.75	287.379	6.85	70.34	0.0065	10.8212
10	0.38	0.1470	29.75	202.381	7.05	59.52	0.0060	9.9206

Tabla 16. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm ²)	Carga de rotura (L) (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura ($\epsilon\%$) (%)	Límite Elástico (σ_y) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ϵ_y)	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.42	0.2668	37.75	141.492	11.10	70.28	0.0195	3.6040
2	0.44	0.2698	34.75	128.799	9.40	32.43	0.0025	12.9726
3	0.46	0.2776	34.75	125.180	8.95	31.52	0.0085	3.7083
4	0.47	0.1899	37.75	198.789	7.55	72.41	0.0100	7.2407
5	0.44	0.2121	37.75	177.982	7.85	41.25	0.0100	4.1254
6	0.44	0.2028	36.75	181.213	8.05	67.80	0.0050	13.5602
7	0.45	0.2273	34.25	150.682	4.85	82.49	0.0130	6.3454
8	0.45	0.1879	34.75	184.939	7.65	46.57	0.0070	6.6525
9	0.46	0.2101	37.75	179.676	4.90	41.65	0.0075	5.5529
10	0.40	0.1658	22.75	137.214	5.95	52.77	0.0130	4.0596

Tabla 17. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.50 mm y 0.59 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm ²)	Carga de rotura (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura (ε%)	Límite Elástico (σ _y) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ε _y)	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.50	0.3833	33.75	88.051	10.80	48.92	0.0145	3.3736
2	0.50	0.4927	33.75	68.500	10.35	38.06	0.0050	7.6111
3	0.55	0.3163	38.75	122.510	7.75	59.28	0.0085	6.9740
4	0.57	0.3815	41.75	109.436	4.70	49.15	0.0055	8.9360
5	0.52	0.2695	41.75	154.917	11.85	69.57	0.0075	9.2764
6	0.58	0.2874	39.75	138.309	9.85	82.64	0.0110	7.5125
7	0.57	0.3743	41.75	111.542	12.85	50.09	0.0185	2.7078
8	0.58	0.3627	41.75	115.109	5.15	51.70	0.0090	5.7440
9	0.57	0.3620	41.75	115.331	5.90	51.80	0.0085	6.0936
10	0.58	0.7210	41.75	57.906	7.60	26.01	0.0065	4.0009

Tabla 18. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.60 mm y 0.70 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm ²)	Carga de rotura (L) (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura (ε%) (%)	Límite Elástico (σ _y) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ε _y)	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.60	0.3222	42.75	132.682	15.50	73.71	0.0175	4.2121
2	0.60	0.3353	40.75	121.533	7.40	55.92	0.0100	5.5920
3	0.60	0.3273	40.75	124.504	10.35	106.17	0.0430	2.4691
4	0.69	0.4077	46.75	114.668	6.10	77.88	0.0145	5.3708
5	0.70	0.5866	44.75	76.287	6.55	40.49	0.0055	7.3614
6	0.61	0.4618	37.75	81.745	4.40	40.60	0.0125	3.2482
7	0.66	0.4665	39.75	85.209	5.10	40.19	0.0115	3.4950
8	0.60	0.3842	37.75	98.256	8.25	48.80	0.0110	4.4366
9	0.63	0.3535	44.75	126.591	15.50	81.33	0.0450	1.8073
10	0.66	0.4626	48.75	105.383	15.75	62.15	0.0330	1.8833

4.2. DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS EN MEDIOS ALCALINOS

El objetivo del experimento fue simular la degradación de las fibras que puede ocurrir en la pasta de cemento durante el tiempo de curado. Se sumergieron fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y recubiertas con combinaciones de sustancias hidrófugas: aceite de linaza (LO) y látex de caucho natural (NRL); con materiales cementantes suplementarios (SCM): ceniza de cáscara de arroz (RHA), humo de sílice (SF), y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF), en una solución de hidróxido de sodio por 98 días, pesándolas cada 7 días. Los detalles de los diferentes tratamientos se detallan en la Tabla 5.

Los valores de pérdida de masa en gramos y en porcentaje se muestran en las Tablas 19 y 20 respectivamente. Por un lado, la curva ajustada de NRL-SF (Figura 64) se encuentra por debajo de las curvas ajustadas de F – Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂ , esto muestra la efectividad del recubrimiento látex- humo de sílice en un entorno altamente alcalino como el de hidróxido de sodio. En cambio, la curva de NRL-BRMF (Figura 65), se encuentra por encima de las curvas ajustadas de F – Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂ , esto muestra la poca efectividad del recubrimiento látex- polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado en un entorno altamente alcalino como el de hidróxido de sodio. Por otro lado, de las fibras con una capa de aceite - SCM, la curva ajustada de LO-SF (Figura 67) y LO-BRMF (Figura 68) se encuentran por debajo de las curvas ajustadas de F – Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂ , señalando la efectividad del recubrimiento de aceite - humo de sílice, y aceite – polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado en un entorno altamente alcalino como el de hidróxido de sodio.

Por último, las curvas ajustadas de NRL–RHA (Figura 63) y LO–RHA (Figura 66) son más o menos similares a la curva de F–Sin_Tratar. Los recubrimientos de látex y aceite con ceniza de cáscara de arroz, no muestran variaciones significativas que las fibras sin tratamiento hasta el final de la curva. Esto podría señalar un efecto retardado de RHA en la protección de la fibra.

Normalmente las fibras vegetales no se descomponen completamente dentro del material compuesto de cemento, las partículas de las fibras vegetales mineralizadas se vuelven inertes dentro del material compuesto pero también quebradizas, menos porosas y débiles a tensión (Marceau and Delannoy 2017). La ausencia del carbonato de calcio en la solución de hidróxido de sodio no hace posible la mineralización de las fibras pudiendo darse un proceso de degradación más drástico que en matrices de cemento.

Tabla 19. Pérdida de masa (g) de fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos y recubrimientos en una solución alcalina de hidróxido de sodio.

Tiempo (Días)	F-Sin_Trtar (g)	T-Ca(OH) ₂ (g)	NRL-RHA (g)	NRL-SF (g)	NRL-BRMF (g)	LO-RHA (g)	LO-SF (g)	LO-BRMF (g)
7	0.01329	0.03790	0.01380	0.01972	0.01268	0.01976	0.01668	0.03132
14	0.01215	0.03591	0.01326	0.01897	0.01227	0.01889	0.01588	0.03058
21	0.01221	0.03459	0.01298	0.01897	0.01159	0.01883	0.01558	0.02965
28	0.01120	0.03326	0.01214	0.01830	0.01072	0.01843	0.01555	0.03027
35	0.01098	0.03175	0.01167	0.01709	0.01006	0.01772	0.01505	0.02920
42	0.01088	0.03137	0.01138	0.01651	0.00918	0.01663	0.01441	0.02871
49	0.01019	0.02975	0.01088	0.01584	0.00856	0.01529	0.01370	0.02504
56	0.00992	0.02445	0.00965	0.01507	0.00846	0.01514	0.01323	0.02403
63	0.00945	0.02177	0.00915	0.01443	0.00745	0.01315	0.01248	0.02386
70	0.00926	0.02086	0.00883	0.01385	0.00662	0.01299	0.01213	0.02324
77	0.00870	0.02040	0.00862	0.01324	0.00575	0.01263	0.01188	0.02140
84	0.00770	0.01990	0.00790	0.01270	0.00470	0.01190	0.01137	0.02080
91	0.00753	0.01864	0.00780	0.01248	0.00405	0.01182	0.01027	0.02048
98	0.00731	0.01760	0.00773	0.01220	0.00336	0.01176	0.01010	0.01827

Tabla 20. Pérdida de masa (%) de fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos y recubrimientos en una solución alcalina de hidróxido de sodio.

Tiempo (Días)	F-Sin Tratar (%)	T-Ca(OH) ₂ (%)	NRL-RHA (%)	NRL-SF (%)	NRL-BRMF (%)	LO-RHA (%)	LO-SF (%)	LO-BRMF (%)
14	8.59	5.24	3.87	3.81	3.23	4.42	4.80	2.36
21	8.13	8.73	5.92	3.80	8.61	4.71	6.59	5.33
28	15.73	12.24	12.03	7.20	15.46	6.73	6.77	3.35
35	17.38	16.23	15.41	13.33	20.66	10.32	9.77	6.77
42	18.13	17.23	17.51	16.27	27.60	15.84	13.61	8.33
49	23.33	21.50	21.14	19.67	32.49	22.62	17.87	20.05
56	25.36	35.49	30.05	23.58	33.28	23.38	20.68	23.28
63	28.89	42.56	33.68	26.82	41.27	33.45	25.18	23.82
70	30.32	44.96	36.00	29.76	47.79	34.26	27.28	25.80
77	34.54	46.17	37.52	32.86	54.63	36.08	28.78	31.67
84	42.06	47.49	42.74	35.60	62.93	39.78	31.84	33.59
91	43.34	50.82	43.46	36.71	68.06	40.18	38.43	34.61
98	45.00	53.56	43.97	38.13	73.50	40.49	39.45	41.67

Figura 63. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con NRL-RHA en relación a F-Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂.

(Figura elaborada por el autor a partir de las [Tablas 19 y 20](#))

Figura 64. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con NRL-SF en relación a F-Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂.

(Figura elaborada por el autor a partir de las [Tablas 19 y 20](#))

Figura 65. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con NRL-BRMF en relación a F-Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂.

(Figura elaborada por el autor a partir de las [Tablas 19 y 20](#))

Figura 66. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con LO-RHA en relación a F-Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂.

(Figura elaborada por el autor a partir de las [Tablas 19 y 20](#))

Figura 67. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con LO-SF en relación a F-Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂.

(Figura elaborada por el autor a partir de las [Tablas 19 y 20](#))

Figura 68. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con LO-BRMF en relación a F-Sin_Tratar y T-Ca(OH)₂.

(Figura elaborada por el autor a partir de las [Tablas 19 y 20](#))

4.3. CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS (SCM)

4.3.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

La Tabla 21 muestra la composición de óxidos de los SCM: ceniza de cáscara de arroz (RHA), humo de sílice (SF), y finos de polvo de mortero reciclado quemado (BRMF). La presencia de óxido de sílice es superior al 70% en los SCM. Al mismo tiempo, la cantidad de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ supera el 70% en los SCM, de hecho, tienen características puzolánicas similares a las cenizas volantes de Clase F (ASTM C618 y EN 450-1) (ASTM 2012; EN 2012). Por su parte BRMF a diferencia de RHA y SF contiene Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , y Sb_2O_3 .

Tabla 21. Composición química de los SCM

Composición química (% en masa)	RHA	SF	BRMF
Óxido de Silicio (SiO_2)	88.90	84.70	64.70
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	-	-	12.50
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	0.13	1.16	4.34
Óxido de Calcio (CaO)	1.15	0.77	11.50
Óxido de Magnesio (MgO)	-	-	0.74
Óxido de Potasio (K_2O)	4.02	1.25	2.11
Azufre (S)	0.24	0.13	0.44
Óxido de Manganeseo (MnO)	0.32	0.11	0.11
Óxido de Zinc (ZnO)	0.01	0.41	-
Óxido de Estaño (SnO_2)	0.59	0.26	0.25
Óxido de fósforo (P_2O_3)	0.90	-	-
Óxido de Plomo (PbO)	-	0.14	-
Óxido de Titanio (TiO_2)	-	-	0.52
Óxido de Antimonio (Sb_2O_3)	-	-	2.47
$\Sigma (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	89.03	85.86	81.54

4.3.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA

La Tabla 22 muestra los tamaños de partícula de los materiales cementantes suplementarios SCM. Las cenizas de cáscara de arroz (RHA) presentan menor tamaño de partícula que el humo de sílice (SF) y el polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BMRF).

Tabla 22. Distribución del tamaño de partícula de los materiales cementantes suplementarios.

Tamiz (Nº)	Porcentaje que pasa		
	RHA	SF	BRMF
35	0.76	0.25	0.21
45	1.70	2.52	2.33
60	5.18	18.84	8.90
70	16.19	15.64	72.07
120	20.50	38.88	7.77
200	49.48	16.69	6.00
230	6.12	5.22	2.18
325	0.07	1.95	0.54
Tamaño medio de partícula (um)	123.74	155.76	200.18

4.3.3. MORFOLOGÍA

Las Figuras 69a, 69b, y 69c muestran la morfología de los materiales cementantes suplementarios (SCM). Las cenizas de cáscara de arroz (RHA) presentan formas planas y amorfas angulares, por su parte las partículas de humo de sílice (SF) presentan formas esféricas, y el polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF) presentan formas planas y amorfas.

Figura 69. Microscopía óptica de los SCM: (a) RHA, (b) SF, y (c) BRMF.

(Microscopías del autor)

4.3.4. EFECTOS DE LOS SCM SOBRE EL pH DE LA SOLUCIÓN

AGUA CEMENTO

Según (Manso, S and Aguado 2017) el pH tiene un papel clave en la cinética química de la influencia de los materiales cementantes suplementarios (SCM) sobre el cemento. En el presente estudio se midió el pH de soluciones de agua – cemento, y soluciones de agua – cemento – SCM por el método de lixiviación ex-situ (ESL).

La hidratación de materiales cementosos implica una secuencia de reacciones químicas entre los componentes sólidos del cemento y el agua (Barneyback, Diamond, and Lafayette 1981). Los sistemas basados en cemento Portland (PC) desarrollan una alcalinidad inicial muy alta (pH alrededor de 12 a 13) en donde los metales contaminantes se precipitan como hidróxidos insolubles (Iyengar and Al-Tabbaa 2007). Los hidróxidos metálicos tienen una solubilidad mínima dentro de un rango de pH de 8 a 11 (Randall and Chattopadhyay 2004). El rango de pH sobre el cual los geles CSH permanecen estables es entre 10.18 a 12.48 (Martínez-Ramírez and Blanco-Varela 2009). La química de la solución de poros es de vital importancia para comprender la movilidad de los elementos traza y los procesos de migración en el cemento (Andersson et al. 1989). Esto se puede dividir en tres etapas (Van Loon and Glaus 1997): (1) disolución de NaOH y KOH (con un pH de alrededor de 13.4), (2) disolución de Ca (OH)₂ (el pH cae a 12.5) y (3) disolución de geles de silicato de calcio hidratado CSH (el pH permanece por encima de 12.5). Un rango de pH entre 5.5 y 8.5 es favorable para el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos (Eweis et al. 1998). Se sabe que la alta alcalinidad de la solución de poros es el factor principal que acelera la degradación de la celulosa y la lignina (Wei and Meyer 2015).

En la [Tabla 23](#) se muestra la evolución del pH del cemento Portland (PC) y de las sustituciones con SCM al 30%: sustitución del cemento Portland con 30% de humo de sílice (PC-SF 30%), sustitución del cemento Portland con 30% de ceniza de cáscara de arroz (PC-SF 30%), y sustitución del cemento Portland con 30% de polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (PC-BRMF 30%). Se observó que el SF empieza sus efectos de disminución del pH a partir de día 14 ([Figura 71](#)), la RHA a partir del día 21 ([Figura 70](#)), y el BRMF desde el día 7 hasta el 28 ([Figura 72](#)). La línea de ajuste de BRMF es muy similar a la del PC. SF y RHA tienen un efecto tardío en el PC. Sin embargo, SF presenta un mejor efecto. Los valores de pH de SF y la RHA son inferiores a la del PC, eso muestra la efectividad puzolánica. Los SCM que son bajos en álcali y calcio, y altos en sílice tienden a ser los más efectivos para reducir la alcalinidad de la solución de poros. Sin embargo, las contribuciones pueden mejorar si disminuye el tamaño de partícula. Se puede mejorar la actividad puzolánica de RHA a través de molienda. La molienda es apropiada hasta cierto tamaño de partícula permite reducir los efectos adversos producidos por el alto contenido de carbono, y permite aumentar la homogeneidad de las cenizas (Chao-Lung, Anh-Tuan, and Chun-Tsun 2011). Según el estudio de (Alex, Dhanalakshmi, and Ambedkar 2016). la molienda de RHA durante 60 min imparte mayor resistencia en el mortero, situación que puede atribuirse a la reducción del contenido de agua, al efecto de relleno y a la mayor reacción puzolánica de RHA más finas.

Tabla 23. Evolución del pH del cemento portland, y de las sustituciones parciales con SCM al 30%.

Tiempo (Días)	PC	PC-SF 30%	PC-RHA 30%	PC-BRMF 30%
0.04	11.29	11.07	11.23	11.20
1	11.79	11.74	11.68	11.65
7	12.93	12.82	12.73	12.87
14	12.94	13.01	13.05	13.09
21	13.00	12.89	12.98	13.00
28	12.88	12.78	12.96	13.00
35	13.20	13.03	13.05	13.11
42	13.14	13.05	12.85	13.14

Figura 70. Evolución del pH del cemento portland (PC) sustituido parcialmente en un 30% por RHA (PC-RHA 30%).

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 23](#))

Figura 71. Evolución del pH del cemento portland (PC) sustituido parcialmente en un 30% por SF (PC-SF 30%).

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 23](#))

Figura 72. Evolución del pH del cemento portland (PC) sustituido parcialmente en un 30% por BRMF (PC-BRMF30%).

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 23](#))

4.4. MORTEROS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS PIASSABA DE APHANDRA NATALIA CON DIVERSOS TRATAMIENTOS

Los morteros endurecidos después de 28 días fueron sometidos a ensayos de resistencia a la tensión, fueron partidas en dos, una de las mitades se empleó para determinar las propiedades físicas de los morteros, y la otra mitad fueron trituradas para determinar los valores del pH de la solución de poros. Los resultados que se muestran en este apartado corresponden a la media de 3 probetas ensayadas para cada mortero investigado. Se ensayaron probetas testigo de morteros sin fibras (M_TES); morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar); morteros con fibras tratadas con hidróxido de calcio (MF_T-Ca(OH)₂); morteros con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz (MF_NRL-RHA), morteros con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice (MF_NRL-SF), morteros con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_NRL-BRMF); morteros con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz (MF_LO-RHA), morteros con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice (MF_LO-SF), y morteros con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_LO-BRMF).

4.4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

4.4.1.1. TRANSPORTE DE LA HUMEDAD

El transporte de humedad en medios porosos juega un papel importante en la degradación de materiales de construcción, la presencia de agua proporciona un mecanismo y una ruta para la penetración de materiales nocivos como los iones de cloruro y sulfato, estos ingresan al mortero por difusión y acción capilar, la difusión por sí sola puede ser un proceso muy lento, por lo que puede ser que el transporte capilar especialmente cerca de una superficie de mortero insaturado sea el mecanismo de invasión dominante. Comprender el transporte de humedad en el hormigón y en el mortero es importante para estimar su vida útil como material de construcción y mejorar su calidad (Martys and Ferraris 1997).

En la Tabla 24 se muestran los valores de velocidad de ascensión capilar, se destacan los siguientes aspectos: (1) en los (MF–Sin_Tratar) el agua asciende a mayor velocidad que el (M_TES), (2) en el (MF_T–Ca(OH)₂) el agua asciende a menor velocidad que en el (M_TES), y hasta los 2400 segundos a mayor velocidad que en el (MF – Sin_Tratar), (3) en el (MF–Sin_Tratar) y en el (MF_NRL–RHA) el agua asciende a velocidades similares, (4) hasta los 2400 segundos en el (MF_NRL–SF) el agua asciende a mayor velocidad que en el (MF – Sin_Tratar), (5) en el (MF_NRL–BRMF) el agua asciende a mayor velocidad que en el (MF – Sin_Tratar), y a partir de los 2400 segundos a mayor velocidad que (M_TES), (6) en el (MF_LO–RHA) el agua asciende a mayor velocidad que en el (M_TES), y (7) en el (MF_LO–SF) y en el (MF_LO–BRMF) el agua asciende a la misma velocidad que en el (M_TES). De todos los valores expuestos el recubrimiento de las fibras con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara

de arroz (MF_NRL–RHA) disminuye significativamente la velocidad de ascensión capilar de los morteros de cemento fibrosos. Por lo contrario, las fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice (MF_LO–SF), y las fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_LO–BRMF) no realizaron ninguna contribución en la estructura de mesoporos del mortero fibroso.

En relación a la capilaridad, la inclusión de fibras tratadas y sin tratar disminuyeron la capilaridad de los morteros. Los (MF_T–Ca(OH)₂) ([Figura 73](#)) y (MF_NRL–SF) ([Figura 75](#)) incrementan la capilaridad en relación (MF – Sin_Tratar). Las curvas de capilaridad de (MF_NRL–RHA) ([Figura 74](#)) y (MF – Sin_Tratar) son muy similares. Los (MF_NRL–BRMF) ([Figura 76](#)), (MF_LO–RHA) ([Figura 77](#)), (MF_LO–SF) ([Figura 78](#)), (MF_LO–BRMF) ([Figura 79](#)) disminuyen la capilaridad en relación a MF – Sin_Tratar. Esto muestra interacciones químicas entre el aceite de linaza y los finos de los SCM, especialmente entre aceite de linaza y el polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Tabla 24. Capilaridad de los morteros endurecidos a los 28 días.

Tiempo (segundos)	Capilaridad, g/(cm² * h^0.5)									
	M_TES	MF - Sin_Tratar	MF_T-Ca(OH)₂	MF_NRL-RHA	MF_NRL-SF	MF_NRL-BRMF	MF_LO-RHA	MF_LO-SF	MF_LO-BRMF	
180	1.274	1.207	1.228	1.105	1.300	1.189	1.149	1.272	1.300	
300	1.364	1.205	1.314	1.182	1.331	1.269	1.221	1.372	1.387	
600	1.145	1.010	1.084	0.981	1.115	1.067	1.024	1.094	1.155	
900	1.055	0.898	0.991	0.868	0.994	0.986	0.949	1.008	1.019	
1200	1.006	0.853	0.935	0.826	0.929	0.954	0.914	0.961	0.970	
2400	0.775	0.681	0.690	0.678	0.684	0.757	0.721	0.788	0.787	
3600	0.709	0.623	0.625	0.614	0.623	0.696	0.665	0.712	0.712	

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF - Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 73. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* tratadas con hidróxido de calcio (MF_T-Ca(OH)₂) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 74. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz (MF_NRL-RHA) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 75. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice (MF_NRL-SF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 76. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_NRL-BRMF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 77. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz (MF_LO-RHA) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 78. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice (MF_LO-SF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

Figura 79. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_LO-BRMF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar).

(Figura elaborada por el autor)

4.4.1.2. DENSIDAD APARENTE, ABSORCIÓN DE AGUA, Y

POROSIDAD ABIERTA

Los valores de densidad aparente ([Figura 80](#)), absorción de agua ([Figura 81](#)), y porosidad abierta ([Figura 82](#)) corresponden a tres probetas ensayadas para cada mortero de cemento investigado. Las probetas sometidas a estas pruebas son las mismas que se utilizaron durante las pruebas mecánicas. Se puede destacar lo siguiente: (1) Los (MF_T-Ca(OH)₂) incrementaron los valores de densidad aparente, y disminuyeron la absorción de agua y la porosidad abierta; (2) los (MF_NRL-RHA) y los (MF_LO-RHA) presentaron los valores más bajos de densidad, y los valores más altos de absorción de agua y porosidad; y (3) los (MF_NRL-BRMF) presentaron los valores más altos de densidad aparente, y los valores más bajos de absorción de agua y porosidad abierta. Las RHA afectan positivamente la estructura de poros del mortero, la gran cantidad de finos de RHA en el mortero disminuyen la densidad del material por ocupar efectivamente los mesoporos de la matriz, su estructura porosa y su sílice amorfo son responsables de mantener altos niveles de absorción de agua y porosidad, pero la velocidad de ascensión capilar se encuentra baja y la curva de capilaridad es similar a la de las fibras sin tratar ([Figura 74](#)). En cambio, la gran cantidad de finos de BRMF en el mortero incrementan los valores de densidad, sus componentes químicos aceleran la hidratación del cemento (BRMF a diferencia de RHA y SF contiene Al₂O₃, MgO, TiO₂, y Sb₂O₃), y disminuyen la absorción de agua y la cantidad de poros a 28 días, sin embargo, su morfología amorfa y la facilidad para aglomerarse en la matriz ponen en manifiesto la mala calidad de la partícula.

Figura 80. Densidad aparente (g/cm³) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 81. Absorción de agua (%) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 82. Porosidad abierta (%) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Trtar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

4.4.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

4.4.2.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Los resultados de las pruebas mecánicas de resistencia a la flexión ([Figura 83](#)) y módulo de Young ([Figura 84](#)) de los morteros de cemento fibrosos endurecidos a 28 días muestran lo siguiente: (1) los (MF_T-Ca(OH)₂) en relación a los (MF-Sin_Tratar) mejoraron mínimamente la resistencia, sin embargo el valor del módulo de Young se incrementó notablemente, esto se debe a que el tratamiento de hidróxido de calcio refina a la fibra y disminuye su capacidad de absorción de agua por ende de hinchamiento lo que mejora la adhesión fibra – matriz; (2) los morteros con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y materiales cementantes suplementarios (RHA, SF, y BRMF) muestran valores más altos de resistencia a la flexión y módulo de Young por la mayor compatibilidad entre el polímero y los SCM, especialmente destacan los (MF_NRL-BRMF) en los que el Al₂O₃, y MgO de BRMF ([Tabla 21](#)) aceleran la actividad puzolánica viéndose mejoradas las propiedades físicas y mecánicas del compuesto; y (3) Los (MF_LO-SF) y (MF_LO-BRMF) mostraron los valores más bajos de resistencia a la flexión y módulo de Young, esto demuestra interacciones químicas entre el aceite de linaza y el polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado que comprometen la efectividad puzolánica de estos SCM, por ende la durabilidad de las fibras en la matriz.

Figura 83. Resistencia a la flexión (MPa) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 84. Módulo de Young (MPa) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* con diferentes tratamientos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

4.4.3. pH DE LA SOLUCIÓN DE POROS

Los resultados de las pruebas de la evolución del pH en los morteros endurecidos se presentan en la Tabla 25. Antes de realizar las pruebas de pH de solución de poros se trituraron las probetas ensayadas a flexión, los polvos se depositaron en agua destilada para finalmente medir el pH. Se destaca lo siguiente: (1) la inclusión de fibras sin tratar en el mortero disminuye la alcalinidad de la solución de poros; (2) la inclusión de fibras tratadas con hidróxido de calcio en el mortero incrementa la alcalinidad de la solución de poros (Figura 85); (3) el látex natural no influye en la actividad puzolánica de RHA (Figura 86) y SF (Figura 87), en cambio el aceite de linaza es capaz de alterar la actividad puzolánica de RHA (Figura 89), SF (Figura 90), y BRMF (Figura 91) volviendo insostenible la disminución de la alcalinidad de los SCM; y (4) El efecto puzolánico de BRMF no es sostenible (Figuras 86 y 88).

Tabla 25. Evolución del pH de los morteros de cemento portland triturados investigados.

Tiempo (Días)	M_TES	MF – Sin_Tratar	MF_T- Ca(OH) ₂	MF_NRL- RHA	MF_NRL-SF	MF_NRL- BRMF	MF_LO- RHA	MF_LO-SF	MF_LO- BRMF
0.04	12.04	11.74	12.00	11.90	11.77	12.12	12.17	12.40	12.44
1	12.07	11.76	12.03	11.77	11.74	12.17	12.19	12.42	12.46
7	11.34	10.80	11.83	11.28	11.61	11.90	11.68	12.21	12.25
14	10.94	9.93	11.73	10.72	10.59	11.55	10.96	12.16	12.19
21	10.50	9.60	10.74	10.11	9.99	11.08	10.48	11.23	12.33
28	10.33	9.52	10.68	9.98	9.89	11.11	10.36	12.04	11.73

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF – Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 85. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* tratadas con hidróxido de calcio (MF_T-Ca(OH)₂) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

Figura 86. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz (MF_NRL-RHA) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

Figura 87. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice (MF_NRL-SF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

Figura 88. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_NRL-BRMF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

Figura 89. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz (MF_LO-RHA) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

Figura 90. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice (MF_LO-SF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

Figura 91. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de *Aphandra natalia* recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_LO-BRMF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF - Sin_Tratar) triturados.

(Figura elaborada por el autor a partir de los datos de la [Tabla 25](#))

5. DISCUSIÓN

5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE LAS FIBRAS PIASSABA DE *APHANDRA NATALIA*

5.1.1. GROSOR DE LA FIBRA Y ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Las fibras piassaba de *Aphandra natalia* presentan secciones transversales irregulares, no circulares. Estadísticamente se pueden agrupar en seis rangos de grosores ([Figura 92](#)). Las fibras más gruesas ([Figura 93](#)) también son las de mayor Área ([Figura 94](#)) de la sección trasversal. Las mayores frecuencias relativas de distribución corresponden a grosores entre 0.30 mm y 0.39 mm (30.73%), y a los grosores entre 0.40 mm y 0.49 mm (29.76%). Estudios similares como el desarrollado por (Elzubair, Maria, and Bonelli 2007) reportaron mayores frecuencias relativas de distribución para las fibras originarias de *Attalea funifera* (38%), y *Leopoldina piassaba* (30%), ambas en el rango de diámetros de 0.4 mm a 0.6 mm. Es decir, las fibras de *Aphandra natalia* son más finas que las fibras de *Attalea funifera* y *Leopoldina piassaba*.

La finura de las fibras trae beneficios en el enlace fibra – matriz de los materiales compuestos por su microestructura más homogénea y la disminución de los cambios volumétricos en la matriz, además se espera que las fibras vegetales más finas presenten mayor resistencia a la tracción y mayor módulo de Young.

Figura 92. Histograma de frecuencia considerando 6 intervalos de grosores.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 93. Media aritmética de los grosores de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción en los diferentes rangos de frecuencia.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 94. Media aritmética de las áreas de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción en los diferentes rangos de frecuencia.

(Figura elaborada por el autor)

5.1.2. MICROESTRUCTURA

Las fibras piassaba de *Aphandra natalia* generalmente se componen de médula, tejidos vasculares, y epidermis o corteza. La médula se compone de células de parénquima esponjoso suave y de color claro, se encuentra en la parte central de la fibra limita con los sistemas de tejidos vasculares (Figura 95) es la responsable de almacenar y transportar nutrientes por toda la planta. Entre la corteza y la médula se encuentran los tejidos vasculares, cada tejido vascular se constituye a la vez por dos tejidos conductores xilema y floema, algunos vasos que se distribuyen en esta porción pueden transportar agua y nutrientes desde las raíces por toda la planta. El sistema de tejido dérmico está representado por la epidermis es la cubierta protectora exterior del cuerpo vegetal primario sirve como límite entre la planta y el entorno externo, también es la encargada de proporcionar resistencia mecánica y protección a la planta (Liu et al. 2015). Por un lado, Las células de parénquima se constituyen por paredes celulares flexibles y delgadas de celulosa (Figura 96) aunque pueden presentar paredes secundarias lignificadas, por otro lado las celdas del tejido vascular tienen diámetros pequeños y paredes celulares gruesas (Figura 97).

El histograma de frecuencia y la microestructura de la sección transversal de cada fibra ensayada a tracción permitió identificar fibras con microestructura completa y fibras fragmentadas o separadas, que se pueden distribuir en las siguientes categorías:

(1) Rango conformado exclusivamente por fibras de microestructura fragmentada.

A este grupo corresponden las fibras más finas, con grosores entre 0.10 mm y 0.19 mm. Estas fibras se desprenden de las fibras de mayor grosor (Figura 98a),

presentan un sistema de tejido vascular (Figura 99) y conservan residuos de la médula (Figura 98b).

- (2) Rango conformado exclusivamente por fibras de microestructura completa. A este grupo corresponden, por un lado, las fibras finas con grosores entre 0.20 mm y 0.29 mm (Figura 100), por otro lado, las fibras más gruesas con espesores entre 0.60 mm y 0.70 mm (Figura 104) presentan la médula central y hasta dos sistemas de tejidos vasculares.
- (3) Rango conformado por fibras de microestructura completa y microestructura fragmentada. A este grupo corresponden las fibras con grosores entre 0.30 mm y 0.59 mm. Las fibras de microestructura completa pueden presentar formas elípticas alargadas (Figura 98c) y otras pueden presentarse más circulares (Figura 98e); en cambio, las fibras con microestructura fragmentada son de forma más irregular pueden conservar restos de la médula (Figura 98d) o gran parte (Figura 98e); algunas de las fibras con grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm presentan la médula central y hasta dos sistemas de tejidos vasculares (Figuras 101a, 101b, 101g, y 101h), otras pueden presentar parte de la médula y un sistema de tejido vascular (Figuras 101c, 101d, 101e, 101f, 101i, y 101j); en relación a las fibras de grosores entre 0.40 mm y 0.49 mm algunas se encuentran constituidas por la médula y hasta dos sistemas de tejidos vasculares (Figuras 102a, 102b, 102e, 102f, 102g, 102h, 102i, y 102j) otras presentan gran parte de la médula y un sistema de tejido vascular (Figuras 102c y 102d); finalmente, en relación a las fibras con grosores entre 0.50 mm y 0.59 mm, algunas se constituyen por la médula y dos sistemas de tejidos vasculares (Figuras 103g y 103i), otras presentan gran parte de la médula y un sistema de tejido vascular (Figuras 103a, 103b, 103c, 103d, 103e, 103f, 103h, y 103j).

Figura 95. Microestructura de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

Figura 96. Ampliación de la médula de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

Figura 97. Ampliación del sistema del tejido vascular de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

Figura 98. Microestructura de fibras piassaba de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor: (a) Microestructura completa de una fibra de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm de la que se desprende una fibra de grosor entre 0.10 mm y 0.19 (b) Microestructura fragmentada de una fibra de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm, (c) Microestructura completa de una fibra de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm. (d) Microestructura fragmentada de una fibra de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm. (e) Microestructura completa de una fibra de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm. (f) Microestructura fragmentada de una fibra de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.

(Microscopías del autor)

Figura 99. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm.

(Microscopías del autor)

Figura 100. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.20 mm y 0.29 mm.

(Microscopías del autor)

Figura 101. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm.

(Microscopías del autor)

Figura 102. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.

(Microscopías del autor)

Figura 103. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.50 mm y 0.59 mm.

(Microscopías del autor)

Figura 104. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.60 mm y 0.70 mm.

(Microscopías del autor)

5.1.3. MORFOLOGÍA DE LA SUPERFICIE Y DEFECTOS

La Figura 105 muestra a lo largo de la epidermis hendiduras continuas propias de la presencia de la médula de la fibra, en las cuales se forman grietas (Figura 91). En las Figuras 107 y 108 se muestra la superficie de las fibra cubierta con células de parénquima junto con cuerpos sobresalientes con formas de esferas espinulosas (Nascimento et al. 2012) ricas en silicio que no se adhieren perfectamente a la superficie de la fibra pudiéndose eliminar por abrasión, restricciones mecánicas, o ataques químicos (Sergio Neves Monteiro 2009).

Las imperfecciones (grietas) se originan en defectos preexistentes ubicados sobre la superficie de la fibra, conducen a concentraciones de tensión mucho más altas que los niveles de tensión aplicados (K. K. Chawla 1993). Los defectos en las fibras se producen irreversiblemente durante el crecimiento de la planta o durante el proceso de decorticación con el cual las fibras se aíslan de la planta (Davies and Bruce 1998). Las imperfecciones sobre la superficie de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* son de origen natural, la médula genera hendiduras continuas a lo largo de la epidermis en las que se forman grietas, estas imperfecciones pueden multiplicarse durante la extracción de las fibras de la planta, y durante el procesamiento de las fibras para ser comercializadas. Durante estos procesos se usan herramientas afiladas como machetes y maderas con clavos, además de martillos para su separación (Borgtoft Pedersen 1992). Por tal razón, las fibras con microestructura fragmentada son más susceptibles a presentar mayor cantidad de daños sobre su superficie que las fibras que conservan su microestructura completa.

Figura 105. Hendiduras de la médula sobre la superficie de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

Figura 106. Grieta en hendidura de la médula sobre la superficie de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

Figura 107. Protuberancias espinulosas sobre la superficie de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

Figura 108. Vista ampliada de las protuberancias espinulosas sobre la superficie de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*.

(Microscopía del autor)

5.1.4. Tensión versus deformación

Desde la [Figura 109](#) hasta la [Figura 114](#) se muestran las curvas tensión – deformación obtenidas durante el ensayo a tracción de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en relación a seis rangos de grosores. Por un lado, en todos los casos se presenta un comportamiento elastoplástico hasta la falla similar al comportamiento de las fibras de lechuguilla (Juárez, Valdez, and Durán 2004). Por otro lado, existe la tendencia de las fibras de mayor grosor o mayor área de sección transversal a soportar más carga ([Figura 116](#)) y a deformarse más ([Figura 117](#)), esto se explica por la mayor cantidad de células conductoras que conforman la médula y los sistemas de los tejidos vasculares.

Durante los ensayos a la tracción de las fibras con microestructura completa las microceldas de la médula son las primeras en separarse, pero las microceldas de los tejidos vasculares son capaces de seguir soportando carga. La médula se constituye en el punto crítico de estas fibras por el colapso de las débiles paredes de las células primarias lo que resulta en una separación de los sistemas de tejidos vasculares, esto se ve respaldado con las [Figuras 115d, 115e, y 115f](#), donde se observa una fractura heterogénea. En cambio, la ausencia de la médula en las fibras fragmentadas (las que se separan de la médula) conlleva una microestructura más uniforme con menos espacios vacíos entre fibrillas, esto se ve respaldado con las [Figuras 115a, 115b, y 115c](#), donde se observa una fractura homogénea. La rotura total se produce cuando la primera fibrilla se rompe propagando el defecto a toda la estructura.

Figura 109. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de *Aphandra natalia* para el intervalo de grosor de 0.10 mm a 0.19 mm.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 110. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de *Aphandra natalia* para el intervalo de grosor de 0.20 mm a 0.29 mm.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 111. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de *Aphandra natalia* para el intervalo de grosor de 0.30 mm a 0.39 mm.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 112. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de *Aphandra natalia* para el intervalo de grosor de 0.40 mm a 0.49 mm.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 113. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de *Aphandra natalia* para el intervalo de grosor de 0.50 mm a 0.59 mm.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 114. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de *Aphandra natalia* para el intervalo de grosor de 0.60 mm a 0.79 mm.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 115. Tipos de fallas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* ensayadas a tracción para diferentes intervalos de grosores: (a) 0.10 mm - 0.19 mm, (b) 0.20 mm - 0.29 mm, (c) 0.30 mm - 0.39 mm, (d) 0.40 mm - 0.49 mm, (e) 0.50 mm - 0.59 mm, y (f) 0.60 mm - 0.70 mm.

(Microscopías del autor)

5.1.5. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y MÓDULO DE YOUNG

Varios estudios realizados a fibras vegetales ensayadas a tracción muestran que a medida que disminuye el diámetro de las fibras incrementan la resistencia a la tracción y el módulo de Young (Baley 2002; Andersons et al. 2005; Karine Charlet et al. 2010; Duval et al. 2011; Bezazi et al. 2014). En el presente estudio se observa una situación similar en relación al grosor de las fibras (Figuras 118 y 119). En las fibras de menor grosor o menor área de la sección transversal los sistemas de tejidos vasculares se caracterizan por paredes celulares gruesas y celdas (lúmenes) de diámetros pequeños capaces de distribuir mejor los esfuerzos por una mayor cantidad de microfibrillas de celulosa, esto permite obtener mejores características para resistir las fuerzas axiales a tensión. A medida que incrementa el grosor de las fibras el esfuerzo último disminuye ya que la carga se distribuye en una mayor área bruta transversal.

Los valores de las propiedades mecánicas de las fibras piassaba originarias de distintas palmas reportadas en diferentes artículos científicos no son comparables por la naturaleza de los experimentos; por ejemplo (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006) investigaron las propiedades mecánicas de las fibras de *Attalea funifera* en función de diferentes longitudes de calibre (150, 120, 80, 50, 25 y 15 mm) sin distinción de los tamaños de las secciones transversales de las fibras; por su parte (Elzubair, Maria, and Bonelli 2007) investigaron las propiedades mecánicas de las fibras de *Attalea funifera* y *Leopoldina piassaba* en función de su diámetro, determinado por el grosor de la fibra, sin embargo existen amplias variaciones entre el área real de la fibra, sección no circular y amorfa, y el área de la forma circular asumida para el cálculo de las propiedades mecánicas; en cambio (Alves Fidelis et al. 2013) detallan la longitud de calibre y el área

Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación

real de la sección transversal de las fibras lo que permite comparar sus valores con los reportados en la presente investigación, las fibras de *Attalea funifera* con área de 0.585 mm² (fibras gruesas), ensayadas a tracción con una longitud de calibre de 40 mm presentan una resistencia a la tracción de 131 MPa, módulo de Young de 3.8 GPa, y deformación de rotura de 11.4 %; por su parte las fibras piassaba de *Aphandra natalia* con un área 0.411 mm² (fibras gruesas) ensayadas a tracción con una longitud de calibre de 20 mm presentan una resistencia a la tracción de 107 MPa, módulo de Young de 4 GPa, y deformación de rotura de 9.5%; aunque se esperaría que las fibras de *Aphandra natalia* con la aérea señalada presenten mayor valor de resistencia, se sabe que a mayor longitud de calibrador existe alta probabilidad que la resistencia a la tracción y el módulo de Young tiende a aumentar, los valores del módulo de Young presentan poca diferencia al igual los valores de la deformación de rotura. Por último en relación a los valores de las propiedades mecánicas, las fibras de piassaba de *Aphandra natalia* pueden ser consideradas de bajo de rendimiento al igual que las fibras de *Attalea funifera* (Figuras 2 y 3).

Figura 116. Carga de rotura de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 117. Deformación de rotura de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 118. Resistencia a la tracción de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor..

(Figura elaborada por el autor)

Figura 119. Módulo de Young de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor.

(Figura elaborada por el autor)

5.1.6. MÓDULO DE WEIBULL DE LAS FIBRAS DE *APHANDRA*

NATALIA

La distribución de Weibull en relación a otras funciones de distribución conocidas se ajusta mejor a variables aleatorias como las fibras (Weibull 1951), frecuentemente se emplea para clasificar la resistencia relativa de las fibras vegetales frente a la probabilidad de falla para obtener una medida de la variabilidad de las propiedades mecánicas, correlacionando la longitud de calibre con los defectos internos y defectos sobre la superficie de las fibras (Paiva et al. 2007; F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008; Alves Fidelis et al. 2013; Guo et al. 2014) o en relación al tratamiento aplicado a la fibra (Kathirselvam et al. 2019). En el presente estudio se plantea como una opción apropiada para obtener una medida de la variabilidad de los valores de la resistencia a la tracción, módulo de Young y deformación de rotura en relación al grosor y la microestructura de las fibras.

Se han sugerido muchos métodos diferentes para estimar los parámetros Weibull, sin embargo, en diseños de muestras pequeñas donde se producen pocos fallos el método de la estimación de máxima verosimilitud es el más apropiado (Genschel et al. 2010). En este trabajo se considera el formulario presentado por (Guo et al. 2014).

La distribución de Weibull de dos parámetros se representa normalmente por la función distribución acumulativa de fallos $F(x)$:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad x > 0, \theta > 0, m > 0 \quad (\text{Ecuación 20})^{14}$$

Donde “ χ ” es el parámetro de posición, define el punto de partida u origen de la distribución. “ θ ” es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo, en nuestro caso puede representar: la resistencia característica, el módulo de Young característico, o la deformación de rotura característica. “ β ” es el parámetro de forma, representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos.

Cualquier grupo de datos que sigan la distribución de Weibull puede representarse por una línea recta. Se puede inferir que el origen es perfectamente conocido y que coincide con los datos experimentales. Partiendo de la Ecuación 24, tomando logaritmos neperianos por dos veces, se obtiene:

$$\ln (-\ln(1 - F(x))) = \beta \ln \chi - (\beta \ln \theta) \quad (\text{Ecuación 21})$$

La gráfica Weibull está graduada a escala funcional de la siguiente forma: En el eje de ordenadas se tiene $\ln (-\ln(1 - F(x)))$ y en el eje de abscisas $\ln \chi$.

Las Figuras 120, 121, y 122 muestran los diagramas Weibull correspondientes a la resistencia a la tracción, módulo de Young y deformación de rotura de las fibras de *Aphandra natalia* en seis rangos de grosor. En todos los casos los puntos rodean

¹⁴ La ecuación 20 varía de la ecuación 1 en la nomenclatura adoptada. La nomenclatura de la ecuación 20 expresa al mismo tiempo la resistencia característica, el módulo de Young característico, y la deformación característica.

adecuadamente la línea ajustada. En los artículos científicos la variabilidad de los valores de las propiedades mecánicas de las fibras vegetales atribuyen; por un lado a los defectos sobre la superficie de la fibra, a la sección transversal no constante a lo largo de la longitud de la fibra, y a la variabilidad de la composición química de una fibra a otro (Baley 2002); por otro lado a los diferentes métodos de prueba empleados y a las diferentes condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura, velocidad de carga, número de muestras analizadas) (Placet, Cisse, and Boubakar 2012). Finalmente al contenido de agua dentro de las fibras (Célino et al. 2014).

En la Tabla 26 se muestra el número de fibras con microestructura completa, y el número de fibras con microestructura fragmentada distribuidas en seis rangos de grosor. Además, en las Tablas 27, 28, y 29 se observan los parámetros Weibull correspondientes a la resistencia a la tracción, módulo de Young, y deformación de rotura respectivamente. El rango conformadas exclusivamente por fibras de microestructura fragmentada se compara con el rango conformado exclusivamente por fibras de microestructura completa.

En relación a la resistencia a la tracción, por un lado, los valores de la media de la resistencia a la tracción y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.10 mm y 0.19 mm, con microestructura fragmentada, corresponden a 563.26 MPa y a 6.52 respectivamente. Por otro lado, los valores de la media de la resistencia a la tracción y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.20 mm y 0.29 mm con microestructura completa corresponden a 266.52 MPa y a 3.09 respectivamente. En complemento, los valores de la media de la resistencia a la tracción y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.60 mm y 0.70 mm, con microestructura

completa corresponden a 107.05 MPa y a 6.68 respectivamente. Es decir, los valores altos de resistencia a la tracción y módulo Weibull guardan relación con la ausencia de la médula, por ende, la ausencia de las imperfecciones que genera sobre la superficie de la fibra. La variabilidad de los valores de la resistencia a la tracción puede atribuirse al tamaño y a la distribución de los defectos sobre la superficie y en el interior de las fibras. Por ejemplo, el tamaño del defecto en promedio más pequeño, y la distribución más estrecha de los defectos son responsables de los valores más altos de la resistencia a la tracción y del módulo Weibull (N. Chawla, Kerr, and Chawla 2005).

En relación al módulo de Young, por un lado, los valores de la media del módulo de Young y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.10 mm y 0.19 mm con microestructura fragmentada corresponden a 23.22 GPa y a 3.19 respectivamente. Por otro lado, los valores de la media del módulo de Young y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.20 mm y 0.29 mm con microestructura completa corresponden a 15.55 GPa y a 3.04 respectivamente. En complemento los valores de la media del módulo de Young y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.60 mm y 0.70 mm con microestructura completa corresponden a 4 GPa y a 2.57 respectivamente. De igual manera que la resistencia a la tracción los valores altos del módulo de Young y el módulo Weibull guardan relación con la ausencia de la médula. Los valores del módulo Weibull de los dos rangos de grosor estudiados son similares principalmente por las aproximaciones de las características geométricas necesarias para calcularlo, además de los defectos naturales sobre la superficie de la fibra (Baley 2002).

Finalmente, en relación a la deformación de rotura, por un lado, los valores de la media de deformación de rotura y de módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.10 mm y 0.19 mm con microestructura fragmentada corresponden a 6.31 % y 8.55 respectivamente. Por otro lado, los valores de la media de la deformación de rotura y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.20 mm y 0.29 mm con microestructura completa corresponden a 6.72 % y 4.29 respectivamente. En complemento los valores de la media de la deformación de rotura y del módulo Weibull de las fibras con grosores entre 0.60 mm y 0.79 mm con microestructura completa corresponden a 9.55 % y a 2.42 respectivamente. Al contrario que la resistencia a la tracción y el módulo de Young el valor bajo de la deformación de rotura y el valor alto del módulo Weibull guardan relación con la ausencia de la médula. Las fibras más finas tienden a deformarse menos que las fibras de más gruesas, su estructura más compacta se relaciona con la ausencia de las celdas de la médula. En el apartado 6.1.4 se exponen las características de la deformación hasta la rotura durante el ensayo a tracción.

En lo que respecta al rango conformado por fibras de microestructura completa y microestructura fragmentada, la distribución asimétrica del número de fibras con estructura completa y fragmentada en los rangos de frecuencia no permite que el módulo Weibull sea comparado, para que suceda, los rangos de frecuencia deben constituirse de la misma cantidad de fibras con estructura completa y fragmentada, sin embargo, por la naturaleza del proceso experimental esto es difícil de controlar.

Tabla 26. Distribución de Fibras con microestructura completa y con microestructura fragmentada en diferentes rangos de grosor.

Intervalo de Diámetro (mm)	Fibras con microestructura completa (unidad)	Fibras con microestructura fragmentada (unidad)
$0.10 \leq g \leq 0.19$	0	10
$0.20 \leq g \leq 0.29$	10	0
$0.30 \leq g \leq 0.39$	4	6
$0.40 \leq g \leq 0.49$	8	2
$0.50 \leq g \leq 0.59$	2	8
$0.60 \leq g \leq 0.70$	10	0

Tabla 27. Parámetros Weibull de la resistencia a la tracción correspondientes a las fibras de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor.

Intervalo de Diámetro (mm)	Módulo Weibull, β	Resistencia a la tracción característica, θ (MPa)	Resistencia media a la tracción (MPa)	Desviación estadística (MPa)
$0.10 \leq g \leq 0.19$	6.517	571.360	563.259	101.27
$0.20 \leq g \leq 0.29$	3.086	264.706	266.524	94.439
$0.30 \leq g \leq 0.39$	2.699	205.679	209.501	83.683
$0.40 \leq g \leq 0.49$	7.404	163.212	160.885	25.656
$0.50 \leq g \leq 0.59$	4.490	109.472	108.384	27.382
$0.60 \leq g \leq 0.70$	6.684	108.598	107.052	18.773

Tabla 28. Parámetros Weibull del módulo de Young correspondientes a las fibras de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor.

Intervalo de Diámetro (mm)	Módulo Weibull, β	Módulo de Young característico, θ (GPa)	Módulo de Young medio (GPa)	Desviación estadística (GPa)
$0.10 \leq g \leq 0.19$	3.185	23.112	23.220	7.998
$0.20 \leq g \leq 0.29$	3.035	15.428	15.553	5.594
$0.30 \leq g \leq 0.39$	2.304	8.180	8.497	3.912
$0.40 \leq g \leq 0.49$	2.113	6.485	6.831	3.397
$0.50 \leq g \leq 0.59$	3.319	6.269	6.281	2.085
$0.60 \leq g \leq 0.70$	2.567	3.907	4.002	1.672

Tabla 29. Parámetros Weibull de la deformación de rotura correspondientes a las fibras de *Aphandra natalia* en diferentes rangos de grosor.

Intervalo de Diámetro (mm)	Módulo Weibull, β	Deformación de rotura característica, θ (%)	Deformación de rotura media (%)	Desviación estadística (%)
$0.10 \leq g \leq 0.19$	8.553	6.395	6.306	0.879
$0.20 \leq g \leq 0.29$	4.286	6.775	6.716	1.769
$0.30 \leq g \leq 0.39$	7.610	7.338	7.234	1.125
$0.40 \leq g \leq 0.49$	4.549	7.709	7.629	1.905
$0.50 \leq g \leq 0.59$	3.656	8.742	8.715	2.652
$0.60 \leq g \leq 0.70$	2.415	9.251	9.546	4.214

Figura 120. Diagramas Weibull de la resistencia a la tracción de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* clasificadas en diferentes rangos de grosor.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 121. Diagramas Weibull del módulo de Young de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* clasificadas en diferentes rangos de grosor.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 122. Diagramas Weibull de la deformación de rotura de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* clasificadas en diferentes rangos de grosor.

(Figura elaborada por el autor)

5.1.7. FUNCIÓN DE FORMA

Por un lado, en la Tabla 30 se muestra para las fibras piassaba de *Aphandra natalia* una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% entre la media de la resistencia a la tracción y la media del módulo de Young, obtenidos del análisis Weibull, con la media del grosor de las fibras ensayadas a tracción. El modelo ajustado explica 99.26% de la variabilidad de la resistencia a la tracción, y el 91.82 % de la variabilidad del módulo de elasticidad señalando una relación relativamente fuerte entre las variables. En las Figuras 123 y 124 se muestra para las fibras piassaba de *Aphandra natalia* una función de proporcionalidad inversa entre la resistencia a la tracción, el módulo de Young y el grosor de las fibras expresado en la Ecuación 22. Muchas fibras vegetales presentan una relación inversa hiperbólica entre el esfuerzo a la tracción final y el diámetro equivalente en particular las fibras de sisal, ramio, curauá (*Ananas erectifolius*), jute, bambú, coco, piassaba (*Atelea funifera*), buriti, y piña (Sergio Neves Monteiro et al. 2011; Inacio, Lopes, and Monteiro 2010; S. N. Monteiro et al. 2011; Andrade et al. 2015).

Por otro lado, en la Tabla 31 se muestra para las fibras piassaba de *Aphandra natalia* una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% entre la media de la resistencia a la tracción y la media del módulo de Young, obtenidos del análisis Weibull, con la media de área de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción. El modelo ajustado explica el 99.81% de la variabilidad de la resistencia a la tracción, y el 91.33 % de la variabilidad del módulo de Young señalando una relación relativamente fuerte entre las variables. En las Figuras 125 y 126 se muestra para las fibras piassaba de *Aphandra natalia* una función de

Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación

proporcionalidad inversa entre la resistencia a la tracción, el módulo de Young y el área de la sección transversal de las fibras en el plano de fractura, expresado en la Ecuación 23.

$$\sigma \text{ o } E = A + \frac{B}{\text{grosor}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\sigma \text{ y } E = (C + D * \ln(\text{Área}))^2 \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde A, B, C, y D son constantes características para cada tipo de fibra. Para la resistencia a la tracción A y C se expresan en MPa, y B y D en MPa mm. En cambio, para el módulo de Young, A y C se expresa en GPa, y B y D en GPa mm.

Estadísticamente se demuestra que las fibras piassaba de *Aphandra natalia* más finas son más fuertes que las de mayor grosor. Existe mayor probabilidad de que una fibra gruesa se rompa a una tensión inferior que una fibra más delgada. Como observación final en la práctica es posible refinar las fibras, lo que permite desarrollar materiales compuestos con mejores propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 30. Coeficientes hiperbólicos para la relación entre la media de la resistencia a la tracción y el módulo de Young, y la media del grosor de las fibras estudiadas.

Característica mecánica	A	B	R-Cuadrado ajustado (%)
Resistencia a la tracción	22.54438438	57.7059816	99.26
Módulo de Young	1.962322639	2.371181477	91.82

Figura 123. Relación entre la media del grosor de las fibras y la media de los valores de la resistencia a la tracción.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 124. Relación entre la media del grosor de las fibras y la media de los valores del módulo de Young.

(Figura elaborada por el autor)

Tabla 31. Coeficientes hiperbólicos para la relación entre la media de la resistencia a la tracción y el módulo de Young, y la media del área de las fibras estudiadas.

Característica mecánica	B	C	R-Cuadrado ajustado (%)
Resistencia a la tracción	6,462485614	4,142944088	99.81
Módulo de Young	1.478269334	0.8360195126	91.33

Figura 125. Relación entre la media del área de la sección transversal de las fibras y la media de los valores de la resistencia a la tracción.

(Figura elaborada por el autor)

Figura 126. Relación entre la media del área de la sección transversal de las fibras y la media de los valores de la resistencia a la tracción.

(Figura elaborada por el autor)

5.2. EFECTOS DE DIFERENTES TRATAMIENTOS SOBRE LAS FIBRAS PIASSABA (*APHANDRA NATALIA*) EN MORTEROS DE CEMENTO

Se utilizaron nuevos tratamientos híbridos para fibras vegetales en morteros de cemento a base de repelentes de agua, residuos agrícolas y de construcción. La efectividad de las combinaciones depende de la calidad de las partículas de los Materiales Cementosos Suplementarios (SCM) y de la compatibilidad con las sustancias adherentes o impermeabilizantes. La Figura 127 ilustra las contribuciones de los SCM y los impermeabilizantes o sustancias adherentes en morteros de cemento con fibras vegetales.

Figura 127. Contribuciones de los SCM y los impermeabilizante o agentes adherentes sobre los morteros de cemento con fibras.

(Figura elaborada por el autor)

5.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS

5.2.1.1. TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

La [Figura 128](#) muestran los valores de las densidades: (MF – Sin_Tratar) y (MF_T-Ca(OH)₂) presentan valores superiores que (M_TES). La [Figura 132](#) muestra los valores de la resistencia a la flexión: (MF – Sin_Tratar y MF_T-Ca(OH)₂) presentan valores inferiores que (M_TES). Esto se debe a la baja proporción de fibras en la mezcla (0.3%), consecuentemente a una alta compactación entre la matriz y las fibras.

La [Figura 129](#) muestra los valores de los coeficientes de absorción de agua: T01 presenta un valor inferior que (M_TES) y (MF – Sin_Tratar). El tratamiento alcalino imparte hidrofobicidad a las fibras al eliminar parte de la lignina y la hemicelulosa (Ozerkan et al. 2013), también elimina impurezas y descompone el haz de fibras en fibras más pequeñas aumentando el área de la superficie efectiva de la fibra (Onuaguluchi and Banthia 2016).

La [Figura 131](#) muestra los valores de velocidad de ascensión capilar (MF – Sin_Tratar) y (MF_T-Ca(OH)₂) presentan valores inferiores que (M_TES). Las fibras tratadas alcalinamente y no tratadas ralentizan la velocidad de ascensión capilar del mortero por la alta compactación entre la matriz y las fibras.

Figura 128. Densidades de los morteros endurecidos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 129. Coeficiente de absorción de agua de los morteros endurecidos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 130. Porosidad abierta de los morteros endurecidos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 131. Velocidad de ascensión capilar de los morteros endurecidos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

5.2.1.2. TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM

La Figura 129 muestra los coeficientes de absorción de agua por inmersión: (MF_NRL–RHA), (MF_NRL–SF) y (MF_NRL–BRMF) presentan valores más bajos que (MF_LO–RHA), (MF_LO–SF) y (MF_LO–BRMF) respectivamente, esto implica que el látex natural es mejor impermeabilizante para las fibras que el aceite de linaza.

La Figura 128 muestra los resultados de las densidades, por una parte (MF_NRL–RHA) presenta igual densidad que (MF_LO–RHA) y menor densidad que el resto de muestras, esto se debe a la gran cantidad de RHA en la mezcla (Obilade 2014; Yuzer et al. 2013). Por otro lado, (MF_NRL–BRMF) tiene una densidad más alta que el resto de las muestras, esto se debe a que parte de los agujeros que no están ocupados por la arena se llenan con BRMF (que son más pequeños), a medida que aumenta la cantidad de BRMF en la mezcla menos vacíos serán ocupados por el agua, causando un mortero más compacto (Braga, De Brito, and Veiga 2012). Finalmente, por la naturaleza del tratamiento, es muy difícil controlar la cantidad de SCM adherida al látex natural.

La Figura 131 muestra los resultados de velocidad de ascensión capilar, por una parte (MF_NRL–RHA) presenta un valor más bajo que (MF – Sin_Tratar), (MF_NRL–SF), y (MF_NRL–BRMF). Por otra, (MF_NRL–BRMF) presenta un valor más alto que (MF – Sin_Tratar), (MF_NRL–SF), y (MF_NRL–RHA). En complemento: La Figura 41a muestra que las partículas de RHA se adhieren homogéneamente al látex natural, algunas de esas partículas (en menor cantidad que BRMF) cuando se separan del polímero presentan tamaños y colores semejantes a las RHA secas o reactivas. Así mismo, la Figura 41b muestra que las partículas de SF se adhieren homogéneamente al

látex natural, sin desprendimientos, el color de las partículas adheridas es semejante al SF seco o reactivo. Finalmente, la Figura 41c muestra que las partículas de BRMF se adhieren de forma homogénea al látex natural, algunas de esas partículas (en mayor cantidad que RHA) al desprenderse del polímero presentan tamaños y colores semejantes a los finos de BRMF seco o reactivo. Esto implica:

- (1) Las fibras impregnadas con látex natural y RHA disminuyen la velocidad de ascensión capilar del mortero, porque los finos de las RHA que se separan del látex natural, ocupan los vacíos que no ocupa la arena, provocando un efecto de relleno de poros que disminuye la demanda de agua (Rukzon, Chindaprasirt, and Mahachai 2009; Alex, Dhanalakshmi, and Ambedkar 2016).
- (2) Las fibras impregnadas con látex natural y BRMF incrementan la velocidad de ascensión del mortero, debido a que los BRMF son muy porosos (Corinaldesi and Moriconi 2009). Esa naturaleza porosa es la responsable de la alta capacidad de absorción de agua que presentan (Narud 1983), que aumentará en proporción a la disminución del tamaño de partícula (Poon, Shui, and Lam 2004), y a la cantidad de pasta de cemento unida a la superficie de las partículas (Butler, West, and Tighe 2011).
- (3) La homogeneidad de la adhesión y el color de los SCM sobre el látex natural conlleva la compatibilidad del polímero y los SCM.

5.2.1.3. TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM

Las Figuras 129 y 131 muestran los resultados de absorción de agua y velocidad de ascensión capilar: el valor de (MF_LO–RHA) es mayor que (MF_NRL–RHA), el valor de (MF_LO–RHA) es mayor que (MF_NRL–SF), y el valor de (MF_LO–BRMF) es mayor que el resto de muestras. En complemento: La Figura 41d muestra que las partículas de RHA se adhieren irregularmente al aceite de linaza (en mayor medida que SF y BRMF), algunas partículas que se separan del aceite se muestran unidas y de color más oscuro que las RHA secas o reactivas. Así mismo, la Figura 41e muestra que las partículas de SF se adhieren irregularmente al aceite de linaza, algunas partículas que se separan del aceite se muestran unidas y de color más oscuro que SF seco o reactivo. Finalmente, la Figura 41f muestra que las partículas de BRMF se adhieren irregularmente al aceite de linaza, algunas partículas que se separan del aceite se muestran unidas y de color más oscuro que los BRMF secos o reactivos. Esto implica:

- (1) El aceite de linaza impermeabiliza las fibras en el mortero (Sellami, Merzoud, and Amziane 2013) en menor medida que el látex natural por su lento proceso de polimerización.
- (2) Reacciones químicas entre el aceite de linaza y los SCM en mayor intensidad con SF y BRMF perjudican la calidad de las partículas, por ende, incrementan su porosidad y absorción de agua.

5.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS

Las [Figuras 132 y 133](#) muestran las propiedades mecánicas de los morteros endurecidos a los 28 días de curado.

5.2.2.1. TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

(MF – Sin_Tratar) y (MF_T-Ca(OH)₂) presentan valores inferiores de resistencia a la flexión que (M_TES), esto se debe por una parte al efecto quelante entre las pectinas de las fibras y los iones de calcio, que disminuye la cantidad de calcio (principal producto de hidratación del cemento) para formar silicatos de calcio hidratados (CSH) que retrasa el endurecimiento del material compuesto (Sawsen et al. 2015). Por otra, las azúcares solubles en el agua resultado de la hidrólisis alcalina de la lignina y a la solubilización parcial de la hemicelulosa contenida en las fibras vegetales provocan el retraso del tiempo de fraguado y la reducción del calor de hidratación del materiales compuesto de cemento (Bilba, Arsène, and Ouensanga 2003).

(MF_T-Ca(OH)₂) presenta mayor resistencia a la flexión y mayor módulo de elasticidad que (MF – Sin_Tratar). Las fibras tratadas alcalinamente incrementan la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad de los morteros endurecidos (Sabarish et al. 2019; Hussain and Ali 2019). Esto ocurre por los efectos del tratamiento sobre las fibras: superficies más rugosas, disminución del diámetro y disminución de la resistencia a la tracción (Suardana, Piao, and Lim 2011); además el tratamiento conduce al depósito de nódulos que contienen calcio sobre las superficies de las fibras, lo que resulta en una

fuerte interacción entre los iones de calcio y las moléculas de pectina, ésta interacción provoca la eliminación de la mayoría de los componentes amorfos dejando moléculas más resistentes y con mayor organización (Le Troedec et al. 2008).

Figura 132. Resistencia a la flexión de los morteros endurecidos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 133. Módulo de Young de los morteros endurecidos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

5.2.2.2. TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM

(MF_NRL-RHA), (MF_NRL-SF) y (MF_NRL-BRMF) presentan valores de resistencia a la flexión más altos que (M_TES) y (MF – Sin_Tratar). Los tratamientos con látex natural y SCM mantienen el módulo de elasticidad del mortero entre los valores de (M_TES) y (MF – Sin_Tratar), esto se debe a la mayor capacidad de carga y la baja deformación obtenida por las fibras vegetales con una capa de recubrimiento formada por la interacción de la película de látex y la puzolana dentro del material compuesto (Jose et al. 2017).

(MF_NRL-RHA) presenta menor resistencia a la flexión y mayor módulo de elasticidad que (MF_NRL-SF). La disminución de la resistencia a la flexión se debe a la mayor cantidad de finos de RHA en la mezcla y a la mayor estructura porosa de la RHA en comparación al SF. El incremento del módulo de elasticidad se debe a la efectividad de los finos de RHA en el relleno de poros (Foong et al. 2015). Aunque los estudios han demostrado que la incorporación de RHA en el mortero puede igualar, incluso superar la resistencia de morteros con adiciones de SF, esto se encuentra condicionado por:

- (1) La cantidad de RHA en la mezcla: el 5% de reemplazo de cemento puede incrementar la resistencia, siendo el 10% de reemplazo el que contribuye en mayor medida por la reducción de grandes cristales de hidróxido de calcio y ettringita consecuencia de las fases adicionales de CSH generadas por la reacción puzolánica, en cambio, adiciones de 15% y 20% pueden debilitar el

mortero por el papel de microagregados porosos que desempeñan las partículas de RHA abundantes (Le, Nguyen, and Ludwig 2014).

- (2) El tamaño de partícula: para participar activamente en la reacción puzolánica, se requiere un tamaño de partícula inferior a 45 μm (Nehdi, Duquette, and El Damatty 2003), para lograr un índice de actividad puzolánica del 100% se requiere un tamaño medio de partícula aproximado a 8 μm (Bouzoubaâ and Fournier 2001), no se logra una actividad puzolánica significativa con un tamaño de partícula inferior a 5,6 μm (Nguyen 2011).
- (3) La estructura porosa: las partículas de RHA más gruesas con mayor volumen de poros influyen en el proceso de hidratación del cemento, a edades tempranas absorben gran cantidad de agua y reducen el efecto de dilución del cemento (Le 2015), y a edades tardías el agua liberada de las partículas mantiene la hidratación continua del cemento (Van Tuan et al. 2011).

MF_NRL–BRMF presenta mayor resistencia a la flexión y mayor módulo de elasticidad que (MF_NRL–RHA) y (MF_NRL–SF), el aumento de la resistencia a la flexión se debe a la mayor cantidad de finos de BRMF incorporados a la mezcla (Braga, De Brito, and Veiga 2012), el aumento del módulo de elasticidad se debe a la mayor cantidad de agregados reciclados en la mezcla (Chakradhara Rao, Bhattacharyya, and Barai 2011) y a su calidad inferior (Behera et al. 2014).

5.2.2.3. TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM

(MF_LO–RHA), (MF_LO–SF), y (MF_LO–BRMF) muestran menor resistencia a la flexión y menor módulo de elasticidad que (MF_NRL–RHA), (MF_NRL–SF), y (MF_NRL–BRMF). Las interacciones químicas entre el aceite de linaza y los SCM disminuyen o mitigan los efectos puzolánicos de los SCM. Por una parte, (MF_LO–RHA) muestra mayor resistencia a la flexión y mayor módulo de elasticidad que (MF_LO–SF) y (MF_LO–BRMF) causado por la mayor cantidad de óxido de sílice de las RHA y la poca reactividad con el aceite. Por otra parte, (MF_LO–BRMF) muestra menor resistencia a la flexión y menor módulo de elasticidad que el resto de tratamientos, provocado por la cantidad de pasta de cemento unida a las superficies de las partículas de BRMF reactivas químicamente con el aceite, inhibiendo los efectos puzolánicos de BRMF.

5.2.3. pH DE LA SOLUCIÓN DE POROS VERSUS LA DEGRADACIÓN DE LAS FIBRAS EN MEDIOS ALCALINOS

Por un lado, la [Figura 134](#) muestra el valor del pH de la solución de poros de morteros de 28 días de curado triturados, correspondientes a morteros de cemento reforzados con fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y recubiertas con una capa de látex o aceite de linaza con SCM. Por otro lado, la [Figura 135](#) muestra la media del valor del pH de la solución agua – cemento Portland (PC), y de sustituciones de PC con 30% de RHA, SF, o BRMF.

5.2.3.1. TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

(MF_T-Ca(OH)₂) presenta menor pérdida de masa a los 28 días y mayor pérdida de masa a los 98 días que (MF – Sin_Tratar). El tratamiento con hidróxido de calcio al eliminar parte de los componentes amorfos de las fibras mejora la condición hidrófuga y detiene el proceso de degradación, pero acelera la mineralización (Ardanuy et al. 2015). Esto se respalda con el pH de la solución de poros, el valor de (MF_T-Ca(OH)₂) es mayor que (MF – Sin_Tratar).

Figura 134. pH de la solución de poros de los morteros endurecidos triturados.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

M_TES: Morteros de cemento sin fibras.

MF_Sin_Tratar: Morteros de cemento con fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Morteros de cemento con fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Morteros de cemento con fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

Figura 135. pH de la solución agua – cemento Portland (PC) y de las sustituciones parciales con materiales cementantes suplementarios al 30%: ceniza de cáscara de arroz (PC-RHA 30%), humo de sílice (PC-SF 30%), y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (PC-BRMF 30%).

(Figura elaborada por el autor)

5.2.3.2. TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM

La Figura 136 muestra las pérdidas de masa de los tratamientos experimentados a los 28 días y 98 días de exposición alcalina.

A los 28 días: (MF_NRL–RHA) presenta un grado de degradación inferior que (MF – Sin_Tratar), mayor que (MF_NRL–SF) y (MF_NRL–BRMF), y similar que (MF_T–Ca(OH)₂). A los 98 días: (MF_NRL–RHA) presenta un grado de degradación inferior que (MF – Sin_Tratar), (MF_T–Ca(OH)₂) y (MF_NRL–BRMF), y mayor que (MF_NRL–SF). Es decir (MF_NRL–RHA) y (MF_NRL–SF) disminuyen el proceso de degradación de las fibras en medios alcalinos al impartir hidrofobicidad y disminuir la alcalinidad, esto puede traducirse en un mortero fibroso con adiciones de RHA de mejor resistencia a la flexión inicial y mayor durabilidad (Wei and Meyer 2016).

Por otro lado, a los 28 días: (MF_NRL–BRMF) presentan un grado de degradación inferior que (MF–Sin_Tratar), (MF_T–Ca(OH)₂) y (MF_NRL–RHA), y mayor que (MF_NRL–SF). A los 98 días: (MF_NRL–BRMF) presenta un grado de degradación mayor que (MF – Sin_Tratar), (MF_T–Ca(OH)₂), (MF_NRL–RHA) y (MF_NRL–SF). Es decir (MF_NRL–BRMF) al igual que (MF_T–Ca(OH)₂) disminuyen el proceso de degradación de las fibras, pero aceleran el proceso de mineralización. Esto se traduce en un mortero fibroso con adiciones de BRMF de mejor resistencia a la flexión inicial, pero con una disminución de su durabilidad en comparación a la del hormigón convencional (Behera et al. 2014).

La RHA y el SF disminuyen el proceso de degradación de las fibras en medios alcalinos, esto concuerda con el pH de la solución de poro, los valores de (MF_NRL-RHA) y (MF_NRL-SF) son menores que los morteros de control (M_TES), y el valor de (MF_NRL-SF) es menor que MF_NRL-RHA. Esto a su vez guarda correspondencia con el pH de la solución agua – cemento Portland (PC), y en relación al PC con sustituciones parciales de SCM; el valor de (PC-RHA) y (PC-SF) son menores que PC, y el valor de (PC-SF) es menor que (PC-RHA). El látex natural imparte hidrofobicidad mientras que la RHA y el SF disminuyen la alcalinidad del mortero. Por lo antes expuesto se puede concluir, que los morteros de cemento con adiciones de RHA y SF son susceptibles a mayor durabilidad, que un mortero de cemento reforzado con fibras tratadas con hidróxido de calcio, o que los morteros de cemento reforzados con fibras recubiertas con una capa de látex natural y BRMF.

5.2.3.3. TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM

La Figura 136 muestra las pérdidas de masa de los tratamientos experimentados a los 28 días y 98 días de exposición alcalina.

Por un lado, a los 28 días: (MF_LO-RHA) y (MF_LO-SF) presentan grados de degradación similares, menores que (MF – Sin_Tratar) y (MF_T-Ca(OH)₂), y mayores que (MF_LO-BRMF). A los 98 días: (MF_LO-RHA) y (MF_LO-SF) presentan menor grado de degradación que (MF – Sin_Tratar), (MF_T-Ca(OH)₂) y (MF_LO-BRMF). Para (MF_LO-RHA) y (MF_LO-SF) existe una correspondencia entre la pérdida de masa de las fibras y la resistencia a la flexión de los morteros. Esto se traduce en un mortero reforzado con fibras recubiertas con una capa de aceite con RHA, y aceite con

SF de mejor resistencia a la flexión inicial. Sin embargo, los valores de pH de la solución de poros de los morteros (MF_LO–RHA) y (MF_LO–SF) son más altos que los morteros de cemento de control. Esto compromete su durabilidad.

Para (MF_LO–BRMF), no se encontró la correlación entre la pérdida de masa de las fibras y la resistencia a la flexión de los morteros. Esto se puede explicar por el mayor tiempo de exposición al aire y a la temperatura ambiente de las fibras con el tratamiento probadas en el mortero, en comparación a las fibras con el tratamiento probadas en la solución alcalina. La interacción química entre el aceite de linaza y el BRMF avanza a medida de la polimerización del aceite. Esta interacción se acentuó con BRMF por la estructura porosa y a la cantidad de pasta de cemento unida a la superficie de las partículas. Sin embargo, la relación entre la resistencia a la flexión con el pH de la solución de poro de los morteros investigados, y el pH de (PC-BRMF), indican un mortero de baja resistencia a la flexión inicial y muy susceptible a una deficiente durabilidad.

Figura 136. Pérdidas de masa de las fibras a los 28 días y 98 días con diferentes tratamientos.

(Figura elaborada por el autor)

Nota:

MF-Sin_Tratar: Fibras sin tratar.

MF_T-Ca(OH)₂: Fibras tratadas con hidróxido de calcio.

MF_NRL-RHA: Fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz.

MF_NRL-SF: Fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice.

MF_NRL-BRMF: Fibras recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

MF_LO-RHA: Fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz.

MF_LO-SF: Fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice.

MF_LO-BRMF: Fibras recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado.

5.2.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

5.2.4.1. TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

Las Figuras 137a y 137b muestran la superficie de una fibra no tratada retirada de la matriz después del ensayo de resistencia a la flexión. Las Figuras 137c y 137d muestran la superficie de una fibra tratada con hidróxido de calcio retirada de la matriz después del ensayo de resistencia a la flexión. El mayor blanqueamiento de las fibras tratadas con hidróxido de calcio se debe a la eliminación de la lignina residual y los extractos de la pared celular (despolimerización). Este proceso mejora la unión fibra – matriz, la unión se reduce de falla por extracción a falla por fractura reduciendo la ductilidad del material compuesto, sin embargo con este tratamiento se ocasiona mineralización y fragilidad de las fibras (Onuaguluchi and Banthia 2016).

Las Figuras 138 y 139 muestran la superficie de la fibra tratada con hidróxido de calcio retirada de la matriz después del ensayo de resistencia a la flexión. El gel de silicato cálcico hidratado (CSH) y la portlandita (CH) sobre la superficie de las fibras mejora la unión fibra – matriz (Anggraini et al. 2017).

Figura 137. Microscopía de las fibras extraídas del mortero endurecido a 28 días de curado: (a) (MF – Sin_Tratar) sección transversal, (b) (MF – Sin_Tratar) superficie de la fibra, (c) (MF_T-Ca(OH)₂) sección transversal, (d) (MF_T-Ca(OH)₂) superficie de la fibra.

(Microscopía del autor)

Figura 138. Superficie de la fibra una fibra piassaba tratada previamente con Ca(OH)_2 obtenida de la matriz de cemento a los 28 días.

(Microscopía del autor)

Figura 139. Superficie de la fibra una fibra piassaba tratada previamente con Ca(OH)_2 obtenida de la matriz de cemento a los 28 días con depósitos de CH y CSH.

(Microscopía del autor)

5.2.4.2. TRATAMIENTOS CON LÁTEX NATURAL- SCM

La Figura 140 muestra la superficie de las fibras (MF_NRL-RHA), (MF_NRL-SF), y (MF_NRL-BRMF) retiradas de la matriz después del ensayo de resistencia a la flexión. Por un lado, (MF_NRL-RHA) muestra a lo largo de la superficie de la fibra, la formación de cristales de CH y un gel blanco de CSH, en mayor intensidad que (MF_NRL-SF) y (MF_NRL-BRMF). Por otro, (MF_NRL-SF) muestra en partes de la superficie de la fibra la formación de cristales de CH y un gel blanco de CSH en menor intensidad que (MF_NRL-RHA). Por último, (MF_NRL-BRMF) muestran en partes de la superficie de la fibra, la formación de cristales de CH y un gel blanco de CSH en menor intensidad que (MF_NRL-RHA) y (MF_NRL-SF). La protección del látex natural y la mayor velocidad en la reacción puzolánica de BRMF son las causas de la menor cantidad de compuestos de calcio sobre la superficie de la fibra del (MF_NRL-BRMF).

Figura 140. Microscopía de las fibras extraídas del mortero endurecido a 28 días de curado: (a) (MF_NRL-RHA) sección transversal, (b) (MF_NRL-RHA) superficie de la fibra, (c) (MF_NRL-SF) sección transversal, (d) (MF_NRL-SF) superficie de la fibra, (e) (MF_NRL-BRMF) sección transversal, (f) (MF_NRL-BRMF) superficie de la fibra.

(Microscopías del autor)

5.2.4.3. TRATAMIENTO CON ACEITE DE LINAZA- SCM

Respecto a (MF_LO–RHA) la Figura 141b muestra en la superficie de la fibra marrón clara un gel blanco formado por CH y CSH. Respecto a (MF_LO–SF) la Figura 141d muestra en la superficie de la fibra marrón oscura (característico de las fibras sanas) una mayor cantidad de gel blanco formado por CH y CSH que (MF_LO–RHA) y (MF_LO–BRMF). Respecto a (MF_LO–BRMF) la Figura 141f muestra en la superficie de la fibra marrón clara (más intenso que MF_LO–SF) un gel blanco formado por CH y CSH. Es decir, (MF_LO–SF) y (MF_LO–BRMF) presentan mayor daño que (MF_LO–RHA) y (MF_LO–SF). Por un lado, esto muestra la menor efectividad del aceite de linaza como protector de las fibras en relación al látex natural. Por otro lado, la estructura porosa de la RHA y los BRMF son responsables de la mayor interacción química con el aceite de linaza y de la mineralización de la fibra.

Figura 141. Microscopía de las fibras extraídas del mortero endurecido a 28 días de curado: (a) (MF_LO-RHA) sección transversal, (b) (MF_LO-RHA) superficie de la fibra, (c) (MF_LO-SF) sección transversal, (d) (MF_LO-SF) superficie de la fibra, (e) (MF_LO-BRMF) sección transversal, (f) (MF_LO-BRMF) superficie de la fibra.

(Microscopía del autor)

6. CONCLUSIONES

La presente tesis abordó dos objetivos, el primero consistió en estudiar una fibra poco común como lo es piassaba de *Aphandra natalia*, y el segundo consistió en obtener un mortero con fibras de *Aphandra natalia* que a los 28 días de curado presente valores más altos de resistencia a la flexión y módulo de Young, y valores más bajos de velocidad de ascensión capilar que los morteros sin fibras, además que las fibras muestren el menor daño y la menor cantidad de compuestos de hidróxido de calcio sobre sus superficies en relación a las fibras sin tratar y tratadas alcalinamente; también se esperó que después de ese tiempo se mantengan valores reducidos de pH de la solución de poro en comparación a los morteros convencionales, y que exista una reducción de los valores de pérdida de masa de las fibras en relación a las fibras sin tratar y tratadas alcalinamente. Esto se traduce en obtener un mortero de mayor resistencia a la flexión a los 28 días que los morteros sin fibras, y de mayor durabilidad ante la humedad del agua que los morteros reforzados con fibras sin tratar. Para estos cometidos se han investigado las propiedades físicas, mecánicas y de microestructura de las fibras, su durabilidad en medios alcalinos, y su desempeño en morteros endurecidos con fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y recubiertas con una capa de NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF), y LO – SCM (RHA, SF, y BRMF).

6.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS DE APHANDRA NATALIA

Las propiedades mecánicas de las fibras fueron discutidas en función de sus grosores, áreas de la sección transversal, y defectos sobre su superficie y microestructura. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- (1) La microestructura de la sección transversal de las fibras puede presentarse completa o fragmentada. Las fibras más gruesas proceden de la vaina y muestran su microestructura completa, pueden separarse durante la extracción y procesamiento en fibras más finas de microestructura fragmentada, otras fibras finas proceden del peciolo de las hojas y presentan su microestructura completa. En las fibras con microestructura completa la médula de las fibras genera hendiduras continuas a lo largo de la epidermis en las que se forman grietas o grandes defectos. En cambio, las fibras con microestructura fragmentada por los duros procesos de extracción y separación son más susceptibles a presentar mayor número de defectos o micro grietas sobre su superficie.
- (2) Las fibras más finas con su microestructura fragmentada presentaron valores superiores de resistencia a la tracción, módulo de Young, y módulo Weibull, lo que señala la ausencia de grandes defectos sobre su microestructura y superficie, al mismo tiempo indica una distribución más estrecha de los defectos o micro grietas sobre su superficie. En cambio, las fibras más gruesas presentaron el valor más alto de deformación de rotura y valor más bajo del módulo Weibull, lo que señala la presencia de un gran defecto sobre su superficie y microestructura, es decir, la médula se constituye en el punto crítico de estas

fibras por el colapso de las débiles paredes de las células primarias lo que resulta en una separación de los sistemas de tejidos vasculares. Esto implica que las fibras más gruesas con su microestructura completa presentan mayor probabilidad de falla a una tensión inferior que las fibras más finas con su microestructura fragmentada.

- (3) Se obtuvo una relación inversamente proporcional entre los valores de la media de la resistencia a la tracción y la media del módulo de Young obtenidos del análisis estadístico Weibull, y la media aritmética del grosor y el área de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción en relación a los seis rangos de frecuencia. Una ecuación hiperbólica del tipo σ y $E = (B + C * \ln(\text{Área}))^2$ representa de mejor manera la correlación inversa entre la resistencia a la tracción, módulo de Young y la media aritmética del área de la sección transversal de las fibras ensayadas a tracción, que las ecuaciones del tipo $\sigma = A + \frac{B}{\text{diámetro}}$ más reportada en los artículos científicos.

6.2. EFECTOS DEL TRATAMIENTO ALCALINO Y LOS RECUBRIMIENTOS DE LAS FIBRAS EN LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS Y LA DEGRADACIÓN ALCALINA

Además, se estudiaron los efectos del tratamiento alcalino y recubrimientos a base NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF) y LO – SCM (RHA, SF, y BRMF) sobre las fibras y en los morteros de cemento a través de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros endurecidos, el pH de la solución de poro de los morteros triturados, la microscopía electrónica de las fibras separadas de los morteros, y de la pérdida de masa de las fibras en una solución alcalina. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

(1) A los 28 días los morteros con fibras tratadas con hidróxido de calcio en relación a los morteros con fibras sin tratar incrementaron los valores de la resistencia a la flexión, módulo de Young, y velocidad de ascensión capilar, además sus fibras mostraron un mayor blanqueamiento o mineralización acelerada que las fibras sin tratar. Después de 28 días estos morteros en relación a los morteros sin fibras y los reforzados con fibras sin tratar aumentaron el valor de pH de la solución de poro, y sus fibras presentaron mayor pérdida de masa. Esto puede traducirse en un mortero fibroso de mayor resistencia a la flexión, pero de menor durabilidad que los morteros con fibras sin tratar.

(2) A los 28 días las fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA en relación a los morteros con fibras sin tratar mejoraron la resistencia a la flexión, y redujeron el módulo de Young y la velocidad de ascensión capilar, además sus

fibras presentaron una menor cantidad de compuestos de calcio sobre sus superficies. Después de 28 días estos morteros en relación a los morteros sin fibras mostraron valores reducidos de pH de la solución de poro, y sus fibras presentaron menor pérdida de masa. Esto puede traducirse en un mortero fibroso de mayor resistencia a la flexión y mayor durabilidad que los morteros con fibras sin tratar.

- (3) A los 28 días las fibras recubiertas con una capa de NRL – SF en relación a los morteros con fibras sin tratar y las fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA presentaron mayor resistencia a la flexión y menor módulo de Young, sin embargo, la velocidad de ascensión capilar fue superior que los morteros con fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA, además sus fibras presentaron una menor cantidad de compuestos de calcio sobre sus superficies. Después de 28 días estos morteros en relación a los morteros sin fibras y con fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA mostraron valores inferiores de pH de la solución de poro y sus fibras presentaron menor pérdida de masa. Esto puede traducirse en un mortero fibroso de mayor resistencia a la flexión y mayor durabilidad que los morteros con fibras sin tratar y que los morteros con fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA.

- (4) A los 28 días las fibras recubiertas con una capa de NRL – BRMF en relación a los morteros con fibras sin tratar y las fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA y NRL – SF presentaron valores más altos de resistencia a la flexión y módulo de Young, aunque la velocidad de ascensión capilar fue superior que los morteros con fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA, sus fibras

presentaron una menor cantidad de compuestos de calcio sobre sus superficies.

Después de 28 días estos morteros en relación a los morteros sin fibras y con fibras recubiertas con una capa de NRL – RHA mostraron valores superiores de pH de la solución de poro y sus fibras presentaron mayor pérdida de masa. Esto puede traducirse en un mortero fibroso de mayor resistencia a la flexión, pero de menor durabilidad que los morteros con fibras sin tratar.

- (5) Las fibras recubiertas con una capa de LO – SCM (RHA, SF, y BRMF) en comparación con las fibras recubiertas con una capa de NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF) provocaron el deterioro de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros, incrementaron los valores del pH de la solución de poro y sus fibras se deterioraron drásticamente. Todo esto se apreció más intensamente en el recubrimiento LO – BRMF.

Finalmente se puede destacar que las fibras recubiertas con una capa de NRL - RHA y NRL - SF son capaces de mejorar la resistencia a la flexión a 28 días y su durabilidad a exposiciones permanentes ante la humedad del agua. En cambio, las fibras recubiertas con una capa de NRL - BRMF son capaces de mejorar la resistencia a la flexión a 28 días sin embargo después de ese tiempo sus fibras se mineralizarían a mayor velocidad que las fibras sin tratar y tratadas con hidróxido de calcio comprometiendo la calidad de los morteros.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación por un lado abordó el estudio de las características mecánicas de las fibras de *Aphandra natalia* en función de sus grosores y áreas de la sección transversal, y la microestructura de las fibras quedando pendiente analizar la distribución de los defectos sobre la superficie de las fibras en función de diferentes longitudes de calibre.

También se estudiaron los efectos del tratamiento con hidróxido de calcio y recubrimientos con NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF) y LO – SCM (RHA, SF, y BRMF) sobre las fibras y en los morteros de cemento a través de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros endurecidos a 28 días de curado y de la microscopía electrónica de las fibras separadas de esos morteros, además del pH de la solución de poro de los morteros triturados y de la pérdida de masa de las fibras en una solución alcalina a más de 28 días. Estos estudios con el respaldo de artículos científicos permitieron plantear predicciones relacionadas con la durabilidad de los morteros ante exposiciones permanentes ante la humedad del agua, sin embargo, quedó pendiente verificar dichas predicciones con ensayos de resistencia a la flexión de morteros endurecidos a más de 90 días de curado. Del mismo modo quedaron pendientes los ensayos de “pull out” o estudios del comportamiento de extracción de las fibras recubiertas con NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF) y LO – SCM (RHA, SF, y BRMF) de la matriz de cemento.

Las fibras recubiertas con una capa de NRL - RHA y NRL - SF fueron capaces de mejorar la resistencia a la flexión a 28 días y su durabilidad ante exposiciones

constantes al agua y a la humedad ambiente, sin embargo, la calidad de las partículas y la reacción puzolánica de RHA pueden mejorarse a través de molienda. En la presente investigación las RHA fueron activadas a una temperatura de calcinación de 500°C por dos horas sin moler quedando pendiente por investigar la efectividad del látex natural con RHA con diferentes tiempos de molienda.

Finalmente, se produjeron reacciones químicas entre LO y los SCM (RHA, SF, y BRMF) que trajeron como consecuencias la reducción de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros endurecidos en comparación al recubrimiento NRL – SCM (RHA, SF, y BRMF). En la presente investigación LO fue empleada como agente adherente de los SCM quedando pendiente experimentar con LO polimerizada térmicamente.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, A C, and C C Lee. 2017. "Effect of Treatments on Properties of Cement-Fiber Bricks Utilizing Rice Husk, Corncob and Coconut Coir." In *Procedia Engineering*, 180:1266–73. The Author(s).
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.288>.
- Abiola, O S. 2017. "8 - Natural Fibre Cement Composites A2 - Fan, Mizi." In , edited by Feng B T - Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction Fu, 205–14. Woodhead Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00008-X>.
- Achour, Abderraouf, Fouad Ghomari, and Naima Belayachi. 2017. "Properties of Cementitious Mortars Reinforced with Natural Fibers." *Journal of Adhesion Science and Technology* 31 (17): 1938–62.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1290572>.
- Aguirre-Maldonado, Eduardo, and Francisco Hernández-Olivares. 2017. "Study of Fine Mortar Powder from Different Waste Sources for Recycled Concrete Production." In *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*, edited by Pilar Mercader-Moyano, 253–62. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_21.
- Ahmad, Zakiah, and Azmi Ibrahim. 2010. "Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Reinforced With Oil Palm Trunk Fiber." *International Journal of Engineering Science and Technology* 2 (5): 1441–50.
- Al-khalaf, Moayad N., Hana A. Yousif, Hana a Yousift, and Hana A. Yousif. 1984. "Use of Rice Husk Ash in Concrete." *International Journal of Cement*

Composites and Lightweight Concrete 6 (4): 241–48.

[https://doi.org/10.1016/0262-5075\(84\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0262-5075(84)90019-8).

Alex, Josephin, J. Dhanalakshmi, and B. Ambedkar. 2016. “Experimental Investigation on Rice Husk Ash as Cement Replacement on Concrete Production.” *Construction and Building Materials* 127: 353–62.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.150>.

AlShaya, N, R Alhomidan, S Alromizan, and W Labib. 2018. “The Use of Plant-Based Natural Fibers in Reinforced Cement Composites.” *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 12 (5): 557–65.

Alves Fidelis, Maria Ernestina, Thatiana Vitorino Castro Pereira, Otávio Da Fonseca Martins Gomes, Flávio De Andrade Silva, and Romildo Dias Toledo Filho. 2013. “The Effect of Fiber Morphology on the Tensile Strength of Natural Fibers.” *Journal of Materials Research and Technology* 2 (2): 149–57.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>.

Amiri, Ali, Chad A. Ulven, and Shanshan Huo. 2015. “Effect of Chemical Treatment of Flax Fiber and Resin Manipulation on Service Life of Their Composites Using Time-Temperature Superposition.” *Polymers* 7 (10): 1965–78.
<https://doi.org/10.3390/polym7101493>.

Andersons, Janis, E. Sparniņš, R. Joffe, and L. Wallström. 2005. “Strength Distribution of Elementary Flax Fibres.” *Composites Science and Technology* 65 (3–4): 693–702. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.001>.

Andersson, Karin, Bert Allard, Monika Bengtsson, and Bertil Magnusson. 1989. “Chemical Composition of Cement Pore Solutions.” *Cement and Concrete Research* 19 (3): 327–32.

Andrade, M. C, Gabriel Oliveira, G. Rodriguez, P. Amoy, F. Muylaert, F. Oliveira, S.

- Neves, et al. 2015. "Evaluation of the Diameter Influence on the Tensile Strength of Pineapple Leaf Fibers (PALF) by Weibull Method." *Materials Research* 18 (Suppl 2): 185–92. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.362514>.
- Anggraini, Vivi, Afshin Asadi, Agusril Syamsir, and Bujang B.K. Huat. 2017. "Three Point Bending Flexural Strength of Cement Treated Tropical Marine Soil Reinforced by Lime Treated Natural Fiber." *Measurement* 111 (July): 158–66. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.045>.
- Aprianti S, Evi. 2017. "A Huge Number of Artificial Waste Material Can Be Supplementary Cementitious Material (SCM) for Concrete Production – a Review Part II." *Journal of Cleaner Production* 142: 4178–94. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>.
- Ardanuy, Mònica, Josep Claramunt, Romildo Dias Toledo Filho, Romildo Dias, Toledo Filho, Mònica Ardanuy, Josep Claramunt, and Romildo Dias Toledo Filho. 2015. "Cellulosic Fiber Reinforced Cement-Based Composites: A Review of Recent Research." *Construction and Building Materials* 79: 115–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.
- Arrigoni, Alessandro, Renato Pelosato, Paco Melià, Gianluca Ruggieri, Sergio Sabbadini, and Giovanni Dotelli. 2017. "Life Cycle Assessment of Natural Building Materials: The Role of Carbonation, Mixture Components and Transport in the Environmental Impacts of Hempcrete Blocks." *Journal of Cleaner Production* 149: 1051–61. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>.
- Ashiquzzaman, M, and SB Hossen. 2013. "Cementing Property Evaluation of Recycled Fine Aggregate." *Int Ref J Eng Sci* 2 (5): 63–68. http://irjes.com/Papers/vol2-issue5/Version_1/I256368.pdf.
- Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. 2003. "UNE-EN

- 1015–18, Methods of Test for Mortars for Masonry. Part 18. Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar.”
- . 2014. “UNE 83980, Concrete Durability. Test Methods. Determination of the Water Absorption, Density and Accessible Porosity for Water in Concrete.”
- ASTM. 1999. “ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates.” Annual Book of American Society for Testing Materials Standards.
- ASTM, C. 2012. “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.” *C618-12a*.
- Azwa, Z. N., B. F. Yousif, A. C. Manalo, and W. Karunasena. 2013. “A Review on the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibres.” *Materials and Design* 47: 424–42. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>.
- Baley, C. 2002. “Analysis of the Flax Fibres Tensile Behaviour and Analysis of the Tensile Stiffness Increase.” *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing* 33 (7): 939–48. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4).
- Balslev, Henrik, Tina R Knudsen, Anja Byg, and Mette Kronborg. 2010. “Traditional Knowledge, Use, and Management of *Aphandra Natalia* (Arecaceae) in Amazonian Peru.” *Economic Botany* 64 (1): 55–67.
- Barnett, J. R., and Victoria A. Bonham. 2004. “Cellulose Microfibril Angle in the Cell Wall of Wood Fibres.” *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 79 (2): 461–72. <https://doi.org/10.1017/S1464793103006377>.
- Barneyback, R S, Sidney Diamond, and West Lafayette. 1981. “(Communicated by D . M . Roy) (Received Nov . 21 ; in Final Form Dec . 29 , 1980).”
- Barra, B N, S F Santos, P V A Bergo, C Alves Jr, K Ghavami, and H Savastano Jr. 2015. “Residual Sisal Fibers Treated by Methane Cold Plasma Discharge for Potential Application in Cement Based Material.” *Industrial Crops & Products*

- Basta, Altaf H., Magdy Z. Sefain, and Iman El-Rewainy. 2011. “Role of Some Treatments on Enhancing the Eco-Friendly Utilization of Lignocellulosic Wastes in Production of Cement-Fiber Bricks.” *BioResources* 6 (2): 1359–75.
- Beckermann, G. W., and K. L. Pickering. 2008. “Engineering and Evaluation of Hemp Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Fibre Treatment and Matrix Modification.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (6): 979–88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.03.010>.
- Behera, Monalisa, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti. 2014. “Recycled Aggregate from C&D Waste & Its Use in Concrete - A Breakthrough towards Sustainability in Construction Sector: A Review.” *Construction and Building Materials* 68: 501–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.
- Bentsen, Niclas Scott, Claus Felby, and Bo Jellesmark Thorsen. 2014. “Agricultural Residue Production and Potentials for Energy and Materials Services.” *Progress in Energy and Combustion Science* 40 (1): 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.09.003>.
- Bergman, Bill. 1984. “On the Estimation of the Weibull Modulus.” *Journal of Materials Science Letters* 3 (8): 689–92.
- Bevan, Rachel, and Tom Woolley. 2008. “Hemp Lime Construction.” *Hemp Lime Construction - A Guide to Building with Hemp-Lime Composites*, 111.
- Bezazi, Abderrezak, Ahmed Belaadi, Mostefa Bouchak, Fabrizio Scarpa, and Katarzyna Boba. 2014. “Novel Extraction Techniques, Chemical and Mechanical Characterisation of Agave Americana L. Natural Fibres.” *Composites Part B: Engineering* 66: 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.014>.

- Bilba, Ketty, Marie-Ange Arsène, and A Ouensanga. 2003. "Sugar Cane Bagasse Fibre Reinforced Cement Composites. Part I. Influence of the Botanical Components of Bagasse on the Setting of Bagasse/Cement Composite." *Cement and Concrete Composites* 25 (1): 91–96.
- Bodros, Edwin, and Christophe Baley. 2008. "Study of the Tensile Properties of Stinging Nettle Fibres (*Urtica Dioica*)." *Materials Letters* 62 (14): 2143–45. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.034>.
- Boll, Thomas, Jens Christian Svenning, Jaana Vormisto, Signe Normand, César Grández, and Henrik Balslev. 2005. "Spatial Distribution and Environmental Preferences of the Piassaba Palm *Aphandra Natalia* (Arecaceae) along the Pastaza and Urituyacu Rivers in Peru." *Forest Ecology and Management* 213 (1–3): 175–83. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.020>.
- Borgtoft Pedersen, H. 1992. "Uses and Management of *Aphandra Natalia* (Palmae) in Ecuador." *Bulletin de l'institut Francais d'etudes Andines* 21 (2): 741–53.
- Bos, H. L., M. J.A. Van Den Oever, and O. C.J.J. Peters. 2002. "Tensile and Compressive Properties of Flax Fibres for Natural Fibre Reinforced Composites." *Journal of Materials Science* 37 (8): 1683–92. <https://doi.org/10.1023/A:1014925621252>.
- Bourmaud, Alain, Claudine Morvan, Anis Bouali, Vincent Placet, Patrick Perré, and Christophe Baley. 2013. "Relationships between Micro-Fibrillar Angle, Mechanical Properties and Biochemical Composition of Flax Fibers." *Industrial Crops and Products* 44: 343–51. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.031>.
- Bousfield, Glenn, Sophie Morin, Nicolas Jacquet, and Aurore Richel. 2018. "Extraction and Refinement of Agricultural Plant Fibers for Composites Manufacturing." *Comptes Rendus Chimie* 21 (9): 897–906.

- Bouzoubaâ, N, and B Fournier. 2001. "Concrete Incorporating Rice-Husk Ash: Compressive Strength and Chloride-Ion Penetrability." *Materials Technology Laboratory. Mtl* 5.
- Braga, Mariana, Jorge De Brito, and Rosário Veiga. 2012. "Incorporation of Fine Concrete Aggregates in Mortars." *Construction and Building Materials* 36: 960–68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031>.
- Butler, L., J. S. West, and S. L. Tighe. 2011. "The Effect of Recycled Concrete Aggregate Properties on the Bond Strength between RCA Concrete and Steel Reinforcement." *Cement and Concrete Research* 41 (10): 1037–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>.
- Céline, Amandine, Sylvain Fréour, Frédéric Jacquemin, and Pascal Casari. 2014. "The Hygroscopic Behavior of Plant Fibers: A Review." *Frontiers in Chemistry* 1 (JAN): 1–12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2013.00043>.
- Chakradhara Rao, M., S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai. 2011. "Influence of Field Recycled Coarse Aggregate on Properties of Concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44 (1): 205–20. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>.
- Chao-Lung, Hwang, Bui Le Anh-Tuan, and Chen Chun-Tsun. 2011. "Effect of Rice Husk Ash on the Strength and Durability Characteristics of Concrete." *Construction and Building Materials* 25 (9): 3768–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.009>.
- Charlet, K., C. Baley, C. Morvan, J. P. Jernot, M. Gomina, and J. Bréard. 2007. "Characteristics of Hermès Flax Fibres as a Function of Their Location in the Stem and Properties of the Derived Unidirectional Composites." *Composites*

Part A: Applied Science and Manufacturing 38 (8): 1912–21.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.03.006>.

Charlet, K., J. P. Jernot, M. Gomina, J. Bréard, C. Morvan, and C. Baley. 2009.

“Influence of an Agatha Flax Fibre Location in a Stem on Its Mechanical, Chemical and Morphological Properties.” *Special Issue on the 12th European Conference on Composite Materials, ECCM 2006* 69 (9): 1399–1403.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.002>.

Charlet, Karine, Jean Paul Jernot, Joël Breard, and Moussa Gomina. 2010. “Scattering of Morphological and Mechanical Properties of Flax Fibres.” *Industrial Crops and Products* 32 (3): 220–24. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.04.015>.

Chawla, Krishan K. 1993. *Ceramic Matrix Composites*. Springer Science & Business Media.

Chawla, N., M. Kerr, and K. K. Chawla. 2005. “Monotonic and Cyclic Fatigue Behavior of High-Performance Ceramic Fibers.” *Journal of the American Ceramic Society* 88 (1): 101–8. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00007.x>.

Claramunt, Josep, Mnica Ardanuy, José Antonio García-Hortal, and Romildo Dias Tolêdo Filho. 2011. “The Hornification of Vegetable Fibers to Improve the Durability of Cement Mortar Composites.” *Cement and Concrete Composites* 33 (5): 586–95. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003>.

Clyne, T W, and Derek Hull. 2019. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge university press.

Çomak, Bekir, Alper Bideci, and Özlem Salli Bideci. 2018. “Effects of Hemp Fibers on Characteristics of Cement Based Mortar.” *Construction and Building Materials* 169: 794–99. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029>.

Conte, L S, G Lercker, P Capella, and M Catena. 1979. "Linseed Oil Composition."

Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse (Italy).

Corinaldesi, Valeria, and Giacomo Moriconi. 2009. "Influence of Mineral Additions on the Performance of 100 % Recycled Aggregate Concrete." *Construction and Building Materials* 23 (8): 2869–76.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>.

Correia, Viviane Da Costa, Sergio Francisco Santos, Gonzalo Mármol, Antonio

Aprigio Da Silva Curvelo, and Holmer Savastano. 2014. "Potential of Bamboo Organosolv Pulp as a Reinforcing Element in Fiber-Cement Materials."

Construction and Building Materials 72: 65–71.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.005>.

d'Almeida, J. R.M. M, R. C.M.P. M P Aquino, and S. N. Monteiro. 2006. "Tensile Mechanical Properties, Morphological Aspects and Chemical Characterization of Piassava (*Attalea Funifera*) Fibers." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (9): 1473–79.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.035>.

Das, Mahuya, and Debabrata Chakraborty. 2006. "Influence of Alkali Treatment on the Fine Structure and Morphology of Bamboo Fibers." *Journal of Applied Polymer Science* 102 (5): 5050–56.

Davies, G. C., and D. M. Bruce. 1998. "Effect of Environmental Relative Humidity and Damage on the Tensile Properties of Flax and Nettle Fibers." *Textile Research Journal* 68 (9): 623–29. <https://doi.org/10.1177/004051759806800901>.

Della, V., I. Kuhn, and D Hotza. 2002. "Rice Husk Ash as an Element Source for Active Silicaproductioin." *Mater. Lett.* 57 (4): 818–21.

[https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00879-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00879-0).

Díaz, Juan Pablo Villate, Flávio De Andrade Silva, and José Roberto Moraes

D'Almeida. 2016. "Effect of Peach Palm Fiber Microstructure on Its Tensile Behavior." *BioResources* 11 (4): 10140–57.

<https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10140-10157>.

Djafari Petroudy, S. R. 2017. *Physical and Mechanical Properties of Natural Fibers*.

Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction. Elsevier

Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>.

Duval, Antoine, Alain Bourmaud, Laurent Augier, and Christophe Baley. 2011.

"Influence of the Sampling Area of the Stem on the Mechanical Properties of Hemp Fibers." *Materials Letters* 65 (4): 797–800.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.11.053>.

Elenga, Raymond Gentil, Philippe Djemia, David Tingaud, Thierry Chauveau, Jean

Goma Maniongui, and Guy Dirras. 2013. "Effects of Alkali Treatment on the Microstructure, Composition, and Properties of the Raffia Textilis Fiber."

BioResources 8 (2): 2934–49. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2934-2949>.

Elzubair, Amal, Claudia Maria Chagas Bonelli, Joao Carlos Miguez Suarez, and

Eloisa Biasotto Mano. 2007. "Morphological, Structural, Thermal and

Mechanical Characterization of Piassava Fibers." *Journal of Natural Fibers* 4

(2): 13–31. https://doi.org/10.1300/J395v04n02_02.

Elzubair, Amal, Claudia Maria, and Chagas Bonelli. 2007. "Morphological ,

Structural , Thermal and Mechanical Characterization of Piassava Fibers" 0478

(April 2013): 37–41. <https://doi.org/10.1300/J395v04n02>.

EN, B S. 2009. "12390-5. Testing Hardened Concrete--Part 5: Flexural Strength of

Test Specimens." *British Standards Institution-BSI and CEN European*

Committee for Standardization.

- . 2012. “450-1, Fly Ash for Concrete—Definition, Specifications and Conformity Criteria.” *British Standards Institution*.
- Evangelista, L., and J. de Brito. 2007. “Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates.” *Cement and Concrete Composites* 29 (5): 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>.
- Evangelista, L., M. Guedes, J. De Brito, A. C. Ferro, and M. F. Pereira. 2015. “Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Fine Recycled Aggregates Made from Concrete Waste.” *Construction and Building Materials* 86: 178–88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>.
- Eweis, Juana B, Sarina J Ergas, Daniel P Y Chang, Edward D Schroeder, and others. 1998. *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill Book Company Europe.
- Fapohunda, Christopher, Bolatito Akinbile, and Ahmed Shittu. 2017. “Structure and Properties of Mortar and Concrete with Rice Husk Ash as Partial Replacement of Ordinary Portland Cement – A Review.” *International Journal of Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2017.07.004>.
- Felekoğlu, Burak, Kamile Tosun, and Bülent Baradan. 2009. “Effects of Fibre Type and Matrix Structure on the Mechanical Performance of Self-Compacting Micro-Concrete Composites.” *Cement and Concrete Research* 39 (11): 1023–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.007>.
- Ferreira, Saulo Rocha, Flávio de Andrade Silva, Paulo Roberto Lopes Lima, Romildo Dias Toledo Filho, Saulo Rocha, Flávio De Andrade, Paulo Roberto, Lopes Lima, Romildo Dias, and Toledo Filho. 2015. “Effect of Fiber Treatments on the Sisal Fiber Properties and Fiber--Matrix Bond in Cement Based Systems.” *Construction and Building Materials* 101: 730–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120>.

- Ferreira, Saulo Rocha, Enzo Martinelli, Marco Pepe, Flávio De Andrade Silva, and Romildo Dias Toledo Filho. 2016. "Inverse Identification of the Bond Behavior for Jute Fibers in Cementitious Matrix." *Composites Part B: Engineering* 95: 440–52. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.097>.
- Foong, Kah Yen, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, and Kim Hung Mo. 2015. "Enhancement of the Mechanical Properties of Lightweight Oil Palm Shell Concrete Using Rice Husk Ash and Manufactured Sand." *Journal of Zhejiang University: Science A* 16 (1): 59–69. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400175>.
- Fuqua, Michael A., Shanshan Huo, and Chad A. Ulven. 2012. "Natural Fiber Reinforced Composites." *Polymer Reviews* 52 (3–4): 259–320. <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.705409>.
- Genschel, Ulrike, William Q Meeker, Publisher Taylor, Ulrike Genschel, and William Q Meeker. 2010. "A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation." *Quality Engineering* 22 (4): 236–55. <https://doi.org/10.1080/08982112.2010.503447>.
- Gunasekaran, Kandaswamy, P. S. Kumar, and M. Lakshmipathy. 2011. "Mechanical and Bond Properties of Coconut Shell Concrete." *Construction and Building Materials* 25 (1): 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.053>.
- Guo, M., T. H. Zhang, B. W. Chen, and L. Cheng. 2014. "Tensile Strength Analysis of Palm Leaf Sheath Fiber with Weibull Distribution." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 62: 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.018>.
- He, Shan, Jishen Qiu, Junxia Li, and En Hua Yang. 2017. "Strain Hardening Ultra-High Performance Concrete (SHUHPC) Incorporating CNF-Coated Polyethylene Fibers." *Cement and Concrete Research* 98 (March): 50–60.

- Hernández-Olivares, Francisco, Rosa Elizabeth Medina-Alvarado, Xavier Eduardo Burneo-Valdivieso, and Alonso Rodrigo Zúñiga-Suárez. 2020. "Short Sugarcane Bagasse Fibers Cementitious Composites for Building Construction." *Construction and Building Materials* 247: 8–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118451>.
- Hussain, Tasaddaq, and Majid Ali. 2019. "Improving the Impact Resistance and Dynamic Properties of Jute Fiber Reinforced Concrete for Rebars Design by Considering Tension Zone of FRC." *Construction and Building Materials* 213: 592–607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.036>.
- Huu, Tran, Shinji Ogihara, Nguyen Huy, and Satoshi Kobayashi. 2011. "Composites : Part B Effect of Alkali Treatment on Interfacial and Mechanical Properties of Coir Fiber Reinforced Poly (Butylene Succinate) Biodegradable Composites." *Composites Part B* 42 (6): 1648–56. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.001>.
- Ilankeeran, Prasanna Kumar, Preetamkumar M Mohite, and Sudhir Kamle. 2012. "Axial Tensile Testing of Single Fibres."
- Inacio, W P, F P D Lopes, and S N Monteiro. 2010. "Diameter Dependence of Tensile Strength by Weibull Analysis: Part III Sisal Fiber." *Matéria (Rio de Janeiro)* 15 (2): 124–30.
- Indran, S., R. Edwin Raj, and V. S. Sreenivasan. 2014. "Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from Cissus Quadrangularis Root." *Carbohydrate Polymers* 110: 423–29. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.04.051>.
- Indran, S., and R. Edwin Raj. 2015. "Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from Cissus Quadrangularis Stem." *Carbohydrate Polymers* 117: 392–99.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.09.072>.

INEN. 2010. “NTE INEN 2536: 2010 Áridos.” *Áridos Para Uso En Morteros Para Mapostería*.

———. 2011. “NTE INEN 696: 2011 Áridos.” *Análisis Granulométrico En Los Áridos, Fino y Grueso*.

Ismail, Zainab Ziad, and Ali J. Jaeel. 2014. “A Novel Use of Undesirable Wild Giant Reed Biomass to Replace Aggregate in Concrete.” *Construction and Building Materials* 67: 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.064>.

Iyengar, S. R., and Abir Al-Tabbaa. 2007. “Developmental Study of a Low-PH Magnesium Phosphate Cement for Environmental Applications.” *Environmental Technology* 28 (12): 1387–1401. <https://doi.org/10.1080/09593332808618899>.

Jami, Tarun, S. R. Karade, and L. P. Singh. 2019. “A Review of the Properties of Hemp Concrete for Green Building Applications.” *Journal of Cleaner Production* 239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>.

Jaouadi, Mounir, Slah M’sahli, and Faouzi Sakli. 2009. “Optimization and Characterization of Pulp Extracted from the Agave Americana L. Fibers.” *Textile Research Journal* 79 (2): 110–20. <https://doi.org/10.1177/0040517508090781>.

Jebadurai, S. Garette, R. Edwin Raj, V. S. Sreenivasan, and J. S. Binoj. 2019. *Comprehensive Characterization of Natural Cellulosic Fiber from Coccinia Grandis Stem. Carbohydrate Polymers*. Vol. 207. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.027>.

Jose, Everton, Maria Lidiane, Fermin Garcia, Celso Fornari, Francisco Martínez, and Mauro Mitsuuchi. 2017. “A New Treatment for Coconut Fibers to Improve the Properties of Cement- Based Composites – Combined Effect of Natural Latex / Pozzolanic Materials.” *Sustainable Materials and Technologies* 12 (April): 44–

51. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.04.003>.

Juárez, César, Pedro Valdez, and Alejandro Durán. 2004. “Fibras Naturales de

Lechuguilla Como Refuerzo En Materiales de Construcción Natural Fibers of

Lechuguilla as Reinforcement in Construction Materials” 19: 83–92.

Kabir, M. M., H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona. 2012. “Chemical Treatments on

Plant-Based Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: An Overview.”

Composites Part B: Engineering 43 (7): 2883–92.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.

Kathirselvam, M., A. Kumaravel, V. P. Arthanarieswaran, and S. S. Saravanakumar.

2019. “Characterization of Cellulose Fibers in Thespesia Populnea Barks:

Influence of Alkali Treatment.” *Carbohydrate Polymers* 217 (February): 178–89.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.063>.

Khedari, Joseph, Pornnapa Watsanasathaporn, and Jongjit Hirunlabh. 2005.

“Development of Fibre-Based Soil-Cement Block with Low Thermal

Conductivity.” *Cement and Concrete Composites* 27 (1): 111–16.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.042>.

Kılınç, Ahmet Çağrı, Cenk Durmuşkahya, and M Özgür Seydibeyoğlu. 2017. “10 -

Natural Fibers BT - Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites.” In

Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 209–35.

Woodhead Publishing. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00010-2)

[101871-2.00010-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00010-2).

Kronborg, Mette, César A. Grández, Evandro Ferreira, and Henrik Balslev. 2008.

“Aphandra Natalia (Arecaceae) – a Little Known Source of Piassaba Fibers from the Western Amazon.” *Revista Peruana de Biología* 15 (3): 103–13.

<https://doi.org/10.15381/rpb.v15i3.3341>.

- Le, Ha Thanh. 2015. "Behaviour of Rice Husk Ash in Self-Compacting High Performance Concrete." *Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, FA Finger-Institut Für Baustoffkunde, Professur Werkstoffe Des Bauens*.
- Le, Ha Thanh, Sang Thanh Nguyen, and Horst Michael Ludwig. 2014. "A Study on High Performance Fine-Grained Concrete Containing Rice Husk Ash." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8 (4): 301–7. <https://doi.org/10.1007/s40069-014-0078-z>.
- Lee, C C, C A Amaylia, and Article Info. 2015. "Effect of Treatment on Surface Modifier and Water Retention Value (WRV) of Natural Fiber." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 9 (25): 101–4.
- Li, Ming, Song Zhou, and Xiaoyang Guo. 2017. "Effects of Alkali-Treated Bamboo Fibers on the Morphology and Mechanical Properties of Oil Well Cement." *Construction and Building Materials* 150: 619–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.215>.
- Liu, Zhulan, Yunfeng Cao, Zhiguo Wang, Hao Ren, Thomas E. Amidon, and Yuanzong Lai. 2015. "The Utilization of Soybean Straw. I. Fiber Morphology and Chemical Characteristics." *BioResources* 10 (2): 2266–80. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2266-2280>.
- Loon, L. R. Van, and M. A. Glaus. 1997. "Review of the Kinetics of Alkaline Degradation of Cellulose in View of Its Relevance for Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories." *Journal of Environmental Polymer Degradation* 5 (2): 97–109. <https://doi.org/10.1007/bf02763593>.
- M. Haameem, J.A., M.S. Abdul Majid, M. Haslan, Mohd Afendi, E.A. Helmi, and Fahmi Idris. 2014. "Effects of Alkaline Treatments on the Tensile Strength of Napier Grass Fibres." *Applied Mechanics and Materials* 695: 340–43.

MA Ismail, Dr. 2007. "Compressive and Tensile Strength of Natural Fibre-Reinforced Cement Base Composites." *AL-Rafdain Engineering Journal (AREJ)* 15 (2): 42–51.

Manimaran, P., S. P. Saravanan, M. R. Sanjay, Suchart Siengchin, Mohammad Jawaid, and Anish Khan. 2019. "Characterization of New Cellulosic Fiber: *Dracaena Reflexa* as a Reinforcement for Polymer Composite Structures." *Journal of Materials Research and Technology* 8 (2): 1952–63.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.015>.

Manso, S, and A Aguado. 2017. "A Review of Sample Preparation and Its Influence on PH Determination in Concrete Samples ; Revisión Sobre La Preparación de Muestras de Hormigón y Su Influencia Sobre La Determinación Del PH." *Materiales de Construcción* 67 (325): 108.
<https://doi.org/10.3989/mc.2017.08515>.

Marceau, Sandrine, and Guillaume Delannoy. 2017. "Durability of Bio-Based Concretes." In *Bio-Aggregates Based Building Materials*, 167–87. Springer.

Marshall, I H. 1983. "An Introduction to Composite Materials: By Derek Hull, Cambridge University Press, Cambridge, 1981. ISBN-0521-23991-5, X+ 246 Pages, Illustrated, Hard Cover£16.00; Paperback (ISBN 0-521-28392-2)£7.95." Elsevier.

Martínez-Ramírez, S., and M. T. Blanco-Varela. 2009. "Fases Termodinámicamente Estables En El Sistema Cerrado CaO-SiO₂-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O a 25°C. Aplicación a Sistemas Cementantes." *Materiales de Construcción* 59 (294): 31–39. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.45407>.

Martirena, F., and J. Monzó. 2017. "Vegetable Ashes as Supplementary Cementitious

- Materials.” *Cement and Concrete Research*, no. August: 0–1.
- <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>.
- Martys, Nicos S, and Chiara F Ferraris. 1997. “Capillary Transport in Mortars and Concrete.” *Cement and Concrete Research* 27 (5): 747–60.
- Matthews, Frank L, and Rees D Rawlings. 1999. *Composite Materials: Engineering and Science*. CRC press.
- Mehta, Ankur, and Deepankar Kumar Ashish. 2020. “Silica Fume and Waste Glass in Cement Concrete Production: A Review.” *Journal of Building Engineering* 29 (March): 100888. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100888>.
- Mehta, P Kumar. 2009. “CEMENTS AND CONCRETE MIXTURES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT.”
- Meneghetti, Simoni M.P., Roberto F. De Souza, Adriano L. Monteiro, and Michèle O. De Souza. 1998. “Substitution of Lead Catalysts by Zirconium in the Oxidative Polymerization of Linseed Oil.” *Progress in Organic Coatings* 33 (3–4): 219–24. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(98\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(98)00058-7).
- Miranda, Cleidiane S, Raigenis P Fiuza, Ricardo F Carvalho, and Nadia M José. 2015. “Efeito Dos Tratamentos Superficiais Nas Propriedades Do Bagaço Da Fibra de Piaçava Attalea Funifera Martius.” *Química Nova* 38 (2): 161–65.
- Mo, Kim Hung, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, Soon Poh Yap, and Siew Cheng Lee. 2016. “Green Concrete Partially Comprised of Farming Waste Residues: A Review.” *Journal of Cleaner Production* 117: 122–38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.022>.
- Mo, Kim Hung, Tung Chai Ling, U. Johnson Alengaram, Soon Poh Yap, and Choon Wah Yuen. 2017. “Overview of Supplementary Cementitious Materials Usage in Lightweight Aggregate Concrete.” *Construction and Building Materials* 139:

- Mohanty, A K, Manjusri Misra, Lawrence T Drzal, Susan E Selke, Bruce R Harte, and Georg Hinrichsen. 2005. “Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction.” *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites, Taylor & Francis: Boca Raton*.
- Monteiro, S. N., K. G. Satyanarayana, A. S. Ferreira, D. C.O. Nascimento, F. P.D. Lopes, I. L.A. Silva, A. B. Bevitori, et al. 2011. “Selection of High Strength Natural Fibers.” *Revista Matéria* 15 (4): 488–505.
<https://doi.org/10.1590/S1517-70762010000400002>.
- Monteiro, Sergio N, Regina Coeli, M P Aquino, Felipe P D Lopes, José Roberto, and M Almeida. 2006. “Tenacidade Ao Entalhe Por Impacto Charpy de Compósitos de Poliéster Reforçados Com Fibras de Piaçava,” 204–10.
- Monteiro, Sergio Neves. 2009. “Properties and Structure of Attalea Funifera Piassava Fibers for Composite Reinforcement - A Critical Discussion.” *Journal of Natural Fibers* 6 (2): 191–203. <https://doi.org/10.1080/15440470902961128>.
- Monteiro, Sergio Neves, Felipe Perissé Duarte Lopes, Anderson Paula Barbosa, Alice Barreto Bevitori, Isabela Leão Amaral Da Silva, and Lucas Lopes Da Costa. 2011. “Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials-An Overview.” *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 42 (10): 2963–74. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0789-6>.
- Moreno Montoya, Luis, Efraín Trujillo de los Ríos, and Lina Osorio Serna. 2007. “Estudio de Las Características Físicas de Haces de Fibra de Guadua Angustifolia.” *Scientia et Technica* 2 (34): 613–17.
<https://doi.org/10.22517/23447214.5719>.
- Munawar, Sasa Sofyan, Kenji Umemura, and Shuichi Kawai. 2007. “Characterization

- of the Morphological, Physical, and Mechanical Properties of Seven Nonwood Plant Fiber Bundles.” *Journal of Wood Science* 53 (2): 108–13.
<https://doi.org/10.1007/s10086-006-0836-x>.
- Nair, Deepa G., Alex Fraaij, Adri A K Klaassen, and Arno P M Kentgens. 2008. “A Structural Investigation Relating to the Pozzolan Activity of Rice Husk Ashes.” *Cement and Concrete Research* 38 (6): 861–69.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.004>.
- Narud, Torben C Hansen and Henrik. 1983. “Strength of Recycled Concrete Made From Crushed Concrete Coarse Aggregate.” *Concrete International* 5 (1).
- Nascimento, Denise Cristina O., Ailton S. Ferreira, Sergio N. Monteiro, Regina Coeli M.P. Aquino, and Satyanarayana G. Kestur. 2012. “Studies on the Characterization of Piassava Fibers and Their Epoxy Composites.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43 (3): 353–62.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.004>.
- Nehdi, Moncef, J. Duquette, and A. El Damatty. 2003. “Performance of Rice Husk Ash Produced Using a New Technology as a Mineral Admixture in Concrete.” *Cement and Concrete Research* 33 (8): 1203–10. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00038-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00038-3).
- Nguyen, V T. 2011. “Rice Husk Ash as a Mineral Admixture for Ultra High Performance Concrete.”
- Nor, Hussin Mohd, and John R. Ebdon. 1998. “Telechelic Liquid Natural Rubber: A Review.” *Progress in Polymer Science (Oxford)* 23 (2): 143–77.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(97\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00028-2).
- Norman, David A., and Richard E. Robertson. 2003. “The Effect of Fiber Orientation on the Toughening of Short Fiber-Reinforced Polymers.” *Journal of Applied*

- Núñez, E. B. Bermejo, A Moragues Terrades, and J. C. Gálvez Ruiz y M. Fernández Cánovas. 2008. “Permeabilidad Y Porosidad En Hormigones Autocompactantes.” *Anales de Mecánica de La Fractura* 2 (2): 581–86.
- Obilade, I.O. 2014. “Use Of Rice Husk Ash As Partial Replacement For Cement In Concrete.” *International Journal of Engineering And Applied Science* 5 (04): 11–16.
- Olivares Santiago, M., C. Galán Marín, and J. Roa Fernández. 2003. “Los Composites. Características y Aplicaciones En La Edificación.” *Informes de La Construcción* 54 (484): 45–62. <https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>.
- Oliveira Filho, Genilson Cunha de, Rui Carlos de Sousa Mota, Ana Claudia Rangel da Conceição, Mirtania Antunes Leão, and Oscar Olimpio de Araujo Filho. 2018. “Data Generated by the Hybridization of Mechanical Properties of Composite Reinforced by Piassava Fiber Fabric.” *Data in Brief* 21: 2330–38. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.084>.
- Onuaguluchi, Obinna, and Nemkumar Banthia. 2016. “Plant-Based Natural Fibre Reinforced Cement Composites: A Review.” *Cement and Concrete Composites* 68: 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>.
- Oudiani, Asma el, Yassine Chaabouni, Slah Msahli, and Faouzi Sakli. 2008. “Crystalline Character of Agave Americana L. Fibers.” *Textile Research Journal* 78 (7): 631–44. <https://doi.org/10.1177/0040517508089757>.
- Ozerkan, Nesibe Gozde, Bappy Ahsan, Said Mansour, and Srinath R. Iyengar. 2013. “Mechanical Performance and Durability of Treated Palm Fiber Reinforced Mortars.” *International Journal of Sustainable Built Environment* 2 (2): 131–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbe.2014.04.002>.

- Paiva, M. C., I. Ammar, A. R. Campos, R. B. Cheikh, and A. M. Cunha. 2007. "Alfa Fibres: Mechanical, Morphological and Interfacial Characterization." *Composites Science and Technology* 67 (6): 1132–38.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.05.019>.
- Papadakis, V G, and S Tsimas. 2002. "Supplementary Cementing Materials in Concrete: Part I: Efficiency and Design." *Cement and Concrete Research* 32 (10): 1525–32.
- Papadakis, Vagelis G. 2000. "Effect of Supplementary Cementing Materials on Concrete Resistance against Carbonation and Chloride Ingress." *Cement and Concrete Research* 30 (2): 291–99.
- Pedersen, Henrik Borgtoft. 1996. "Production and Harvest of Fibers from Aphandra Natalia (Palmae) in Ecuador." *Forest Ecology and Management* 80 (1–3): 155–61. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03632-6](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03632-6).
- Peltola, H., B. Madsen, R. Joffe, and K. Nättinen. 2011. "The Influence of Biocomposite Processing and Composition on Natural Fiber Length , Dispersion and Orientation." *Journal of Materials Science and Engineering A* 1: 190–98.
- Pickering, K. L., M. G. Aruan Efendy, and T. M. Le. 2016. "A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 83: 98–112.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.
- Placet, Vincent, Ousseynou Cisse, and M. Lamine Boubakar. 2012. "Influence of Environmental Relative Humidity on the Tensile and Rotational Behaviour of Hemp Fibres." *Journal of Materials Science* 47 (7): 3435–46.
<https://doi.org/10.1007/s10853-011-6191-3>.
- Poon, C. S., Z. H. Shui, and L. Lam. 2004. "Effect of Microstructure of ITZ on

Compressive Strength of Concrete Prepared with Recycled Aggregates.”

Construction and Building Materials 18 (6): 461–68.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>.

Porras, A., A. Maranon, and I. A. Ashcroft. 2015. “Characterization of a Novel Natural Cellulose Fabric from *Manicaria Saccifera* Palm as Possible Reinforcement of Composite Materials.” *Composites Part B: Engineering* 74:

66–73. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.033>.

Randall, Paul, and Sandip Chattopadhyay. 2004. “Advances in Encapsulation Technologies for the Management of Mercury-Contaminated Hazardous Wastes.” *Journal of Hazardous Materials* 114 (1–3): 211–23.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.010>.

Rao, K. Murali Mohan, and K. Mohana Rao. 2007. “Extraction and Tensile Properties of Natural Fibers: Vakka, Date and Bamboo.” *Composite Structures* 77 (3): 288–95. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.07.023>.

Reddy, K. Obi, C. Uma Maheswari, M. Shukla, and A. Varada Rajulu. 2012. “Chemical Composition and Structural Characterization of Napier Grass Fibers.” *Materials Letters* 67 (1): 35–38. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.09.027>.

Reis, J. M.L., and E. P. Carneiro. 2013. “Effect of Piassava Lees in the Fracture Behavior of Polymer Mortars.” *Composite Structures* 95: 564–68. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.07.008>.

Ridzuan, M. J.M., M. S. Abdul Majid, M. Afendi, S. N. Aqmariah Kanafiah, J. M. Zahri, and A. G. Gibson. 2016. “Characterisation of Natural Cellulosic Fibre from *Pennisetum Purpureum* Stem as Potential Reinforcement of Polymer Composites.” *Materials and Design* 89: 839–47. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.052>.

Ridzuan, M J M, M S Abdul Majid, M Afendi, K Azduwin, and S N Aqmariah. 2015.

“The Effects of the Alkaline Treatment ’ s Soaking Exposure on the Tensile Strength of Napier Fibre.” *Procedia Manufacturing* 2 (February): 353–58.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.062>.

Rocha, Saulo, Flávio De Andrade, Paulo Roberto, Lopes Lima, Romildo Dias, and Toledo Filho. 2017. “Virtual Special Issue Bio Based Building Materials Effect of Hornification on the Structure , Tensile Behavior and Fiber Matrix Bond of Sisal , Jute and Curauá Fiber Cement Based Composite Systems.” *Construction and Building Materials* 139: 551–61.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>.

Rodríguez López, Fernando, and Diego Prado Pérez-Seoane. 1984. “Hormigón Con La Incorporación de Fibras.” *Revista de Obras Públicas*, 779–96.

Roma, Luiz C., Luciane S. Martello, and Holmer Savastano. 2008. “Evaluation of Mechanical, Physical and Thermal Performance of Cement-Based Tiles Reinforced with Vegetable Fibers.” *Construction and Building Materials* 22 (4): 668–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.001>.

Romhány, G., J. Karger-Kocsis, and T. Czigány. 2003. “Tensile Fracture and Failure Behavior of Technical Flax Fibers.” *Journal of Applied Polymer Science* 90 (13): 3638–45. <https://doi.org/10.1002/app.13110>.

Rowell, Roger M, James S Han, and Jeffrey S Rowell. 2000. “Characterization and Factors Effecting Fiber Properties.” *Natural Polymers an Agrofibers Composites*, 115–34.

Rukzon, Sumrerng, Prinya Chindaprasirt, and Rattana Mahachai. 2009. “Effect of Grinding on Chemical and Physical Properties of Rice Husk Ash.” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 16 (2): 242–47.

- Sabarish, K.V., Pratheeba Paul, Bhuvaneshwari, and J. Jones. 2019. "An Experimental Investigation on Properties of Sisal Fiber Used in the Concrete." *Materials Today: Proceedings*, no. xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.686>.
- Salvador, M, V Amigó, A Nuez, O Sahuquillo, R Llorens, and F Mart\`i. 2008. "Caracterización de Fibras Vegetales Utilizadas Como Refuerzo En Matrices Termoplásticos." In *X Congreso Nacional de Materiales*, 1–4.
- Santos, Felipe M.R.dos, Thiago F.de Souza, Danilo M. Barquete, and Franco D.R. Amado. 2016. "Comparative Analysis of the Sisal and Piassava Fibers as Reinforcements in Lightweight Cementitious Composites with EVA Waste." *Construction and Building Materials* 128: 315–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.035>.
- Sarasini, F., and V. Fiore. 2018. "A Systematic Literature Review on Less Common Natural Fibres and Their Biocomposites." *Journal of Cleaner Production* 195: 240–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.197>.
- Saravana Bavan, D., and G. C. Mohan Kumar. 2010. "Potential Use of Natural Fiber Composite Materials in India." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29 (24): 3600–3613. <https://doi.org/10.1177/0731684410381151>.
- Satyanarayana, K. G., K. Sukumaran, P. S. Mukherjee, and S. G.K. Pillai. 1986. "Materials Science of Some Lignocellulosic Fibres." *Metallography* 400 (4): 389–400. [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(86\)90073-X](https://doi.org/10.1016/0026-0800(86)90073-X).
- Sawsen, Chafei, Khadraoui Fouzia, Boutouil Mohamed, Gomina Moussa, Laboratoire Crismat, U M R Ensicaen, Ucbn Cnrs, Bd Mal Juin, and Caen Cedex. 2015. "Effect of Flax Fibers Treatments on the Rheological and the Mechanical

- Behavior of a Cement Composite.” *Construction and Building Materials* 79: 229–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091>.
- Segetin, Michael, Krishnan Jayaraman, and Xun Xu. 2007. “Harakeke Reinforcement of Soil-Cement Building Materials: Manufacturability and Properties.” *Building and Environment* 42 (8): 3066–79. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.033>.
- Sellami, A., M. Merzoud, and S. Amziane. 2013. “Improvement of Mechanical Properties of Green Concrete by Treatment of the Vegetals Fibers.” *Construction and Building Materials* 47: 1117–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>.
- Sharma, Vinay, and P. P. Kundu. 2006. “Addition Polymers from Natural Oils-A Review.” *Progress in Polymer Science (Oxford)* 31 (11): 983–1008. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.09.003>.
- Shebani, A. N., A. J. Van Reenen, and M. Meincken. 2009. “The Effect of Wood Species on the Mechanical and Thermal Properties of Woodg-LLDPE Composites.” *Journal of Composite Materials* 43 (11): 1305–18. <https://doi.org/10.1177/0021998308104548>.
- Shimazaki, K, and M A Colombo. 2010. “Gelatin / Piassava Composites Treated by Electron Beam Radiation,” 303–8.
- Siddique, Rafat. 2011. “Utilization of Silica Fume in Concrete: Review of Hardened Properties.” *Resources, Conservation and Recycling* 55 (11): 923–32. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>.
- Silva, Everton Jose da, Maria Lidiane Marques, Fermin Garcia Velasco, Celso Fornari Junior, Francisco Martínez Luzardo, and Mauro Mitsuuchi Tashima. 2017. “A New Treatment for Coconut Fibers to Improve the Properties of Cement-Based

Composites – Combined Effect of Natural Latex/Pozzolanic Materials.”

Sustainable Materials and Technologies 12: 44–51.

<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.04.003>.

Silva, Flavio de Andrade, Nikhilesh Chawla, and Romildo Dias de Toledo Filho.

2008. “Tensile Behavior of High Performance Natural (Sisal) Fibers.”

Composites Science and Technology 68 (15–16): 3438–43.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.001>.

Sreenivasan, V. S., S. Somasundaram, D. Ravindran, V. Manikandan, and R.

Narayanasamy. 2011. “Microstructural, Physico-Chemical and Mechanical

Characterisation of Sansevieria Cylindrica Fibres - An Exploratory

Investigation.” *Materials and Design* 32 (1): 453–61.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.004>.

Stokke, Douglas D, Qinglin Wu, and Guangping Han. 2013. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*. John Wiley & Sons.

Suardana, N. P.G., Yingjun Piao, and Jae Kyoo Lim. 2011. “Mechanical Properties of

HEMP Fibers and HEMP/PP Composites: Effects of Chemical Surface

Treatment.” *Materials Physics and Mechanics* 11 (1): 1–8.

Thomas, Blessen Skariah. 2018. “Green Concrete Partially Comprised of Rice Husk

Ash as a Supplementary Cementitious Material – A Comprehensive Review.”

Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (March 2017): 3913–23.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>.

Toledo Filho, Romildo D, Karen Scrivener, George L England, and Khosrow

Ghavami. 2000. “Durability of Alkali-Sensitive Sisal and Coconut Fibres in

Cement Mortar Composites.” *Cement and Concrete Composites* 22 (2): 127–43.

Tonoli, Gustavo Henrique Denzin, Ana Paula Joaquim, Marie Ange Arsne, Ketty

- Bilba, and Holmer Savastano. 2007. "Performance and Durability of Cement Based Composites Reinforced with Refined Sisal Pulp." *Materials and Manufacturing Processes* 22 (2): 149–56.
<https://doi.org/10.1080/10426910601062065>.
- Troedec, Marianne Le, David Sedan, Claire Peyratout, Jean Pierre Bonnet, Agnès Smith, René Guinebretiere, Vincent Gloaguen, and Pierre Krausz. 2008. "Influence of Various Chemical Treatments on the Composition and Structure of Hemp Fibres." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (3): 514–22. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.12.001>.
- Tuan, Nguyen Van, Guang Ye, Klaas Van Breugel, Alex L A Fraaij, and Danh Dai Bui. 2011. "The Study of Using Rice Husk Ash to Produce Ultra High Performance Concrete." *Construction and Building Materials* 25 (4): 2030–35.
- Vega-Baudrit, José, Karina Delgado Montero, María Sibaja Ballesteros, and Patricia Alvarado Aguilar. 2008. "Materiales Poliméricos Compuestos Obtenidos a Partir de Los Residuos Generados Por La Agroindustria de La Caña de Azúcar: Una Alternativa Adicional. II." *Revista Iberoamericana de Polímeros* 9 (4): 389–406.
- Wei, Jianqiang, and Christian Meyer. 2015. "Cement and Concrete Research Degradation Mechanisms of Natural Fiber in the Matrix of Cement Composites." *Cement and Concrete Research* 73: 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.019>.
- . 2016. "Utilization of Rice Husk Ash in Green Natural Fiber-Reinforced Cement Composites: Mitigating Degradation of Sisal Fiber." *Cement and Concrete Research* 81: 94–111.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.001>.
- . 2017. "Degradation of Natural Fiber in Ternary Blended Cement Composites

Containing Metakaolin and Montmorillonite.” *Corrosion Science* 120: 42–60.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.12.004>.

Weibull, Waloddi. 1951. “Wide Applicability.” *Journal of Applied Mechanics* 103 (730): 293–97.

Xinwei, Ma, Han Zhaoxiang, and Li Xueying. 2010. “Reactivity of Dehydrated Cement Paste from Waste Concrete Subjected to Heat Treatment.” In *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.

Yu, Rui, Zhonghe Shui, and Jun Dong. 2013. “Using Dehydrated Cement Paste as New Type of Cement Additive.” *ACI Materials Journal* 110 (4): 395.

Yusriah, L., S. M. Sapuan, E. S. Zainudin, and M. Mariatti. 2014. “Characterization of Physical, Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Agro-Waste Betel Nut (Areca Catechu) Husk Fibre.” *Journal of Cleaner Production* 72: 174–80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.025>.

Yuzer, Nabi, Zekiye Cinar, Fevziye Akoz, Hasan Biricik, Yelda Yalcin Gurkan, Nihat Kabay, and Ahmet B. Kizilkanat. 2013. “Influence of Raw Rice Husk Addition on Structure and Properties of Concrete.” *Construction and Building Materials* 44: 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.070>.

Zukowski, Bartosz, Flávio de Andrade Silva, and Romildo Dias Toledo Filho. 2018. “Design of Strain Hardening Cement-Based Composites with Alkali Treated Natural Curauá Fiber.” *Cement and Concrete Composites* 89: 150–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.006>.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de distribución de las tres especies de piassaba en América del Sur.	2
Figura 2. Resistencia a la tracción versus el módulo de Young de las fibras del tallo de <i>Cissus quadrangularis</i> (T_CQ), de las fibras de la raíz de <i>Cissus quadrangularis</i> (R_CQ), de las fibras del sisal (FS), de fibras de la banana (FBN), de las fibras del bambú (FB), de las fibras de la palma datilera (FPD), de las fibras de la cáscara de coco (FCC), de las fibras piassaba de <i>Attalea funifera</i> (P_AF), y de las fibras piassaba de <i>Aphandra natalia</i> (P_AN).	15
Figura 3. Resistencia a la tracción versus deformación de rotura de las fibras del tallo de <i>Cissus quadrangularis</i> (T_CQ), de las fibras de la raíz de <i>Cissus quadrangularis</i> (R_CQ), de las fibras del sisal (FS), de fibras de la banana (FBN), de las fibras del bambú (FB), de las fibras de la palma datilera (FPD), de las fibras de la cáscara de coco (FCC), de las fibras piassaba de <i>Attalea funifera</i> (P_AF), y de las fibras piassaba de <i>Aphandra natalia</i> (P_AN).	16
Figura 4. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Sisal (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).	20
Figura 5. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Yute (Alves Fidelis et al. 2013).	21
Figura 6. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Raíz de <i>Cissus quadrangularis</i> (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014).	22
Figura 7. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de Tallo de <i>Cissus quadrangularis</i> (Indran and Raj 2015).	23
Figura 8. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de <i>Coccinia grandis</i> (Jebadurai et al. 2019).	24
Figura 9. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la resistencia a la tracción de las fibras de <i>Attalea funifera</i> (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006).	25
Figura 10. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Sisal (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).	26
Figura 11. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Yute (Alves Fidelis et al. 2013).	27
Figura 12. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Raíz de <i>Cissus quadrangularis</i> (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014).	28

Figura 13. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de Tallo de <i>Cissus quadrangularis</i> (Indran and Raj 2015).....	29
Figura 14. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de <i>Coccinia grandis</i> (Jebadurai et al. 2019).....	30
Figura 15. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y el módulo de Young de las fibras de <i>Attalea funifera</i> (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006).....	31
Figura 16. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Sisal (F. de A. Silva, Chawla, and Filho 2008).	32
Figura 17. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Yute (Alves Fidelis et al. 2013).....	33
Figura 18. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Raíz de <i>Cissus quadrangularis</i> (Indran, Edwin Raj, and Sreenivasan 2014). ...	34
Figura 19. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de Tallo de <i>Cissus quadrangularis</i> (Indran and Raj 2015).	35
Figura 20. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de <i>Coccinia grandis</i> (Jebadurai et al. 2019).	36
Figura 21. Gráfica de línea ajustada de la relación entre la longitud de calibre y la deformación de rotura de las fibras de <i>Attalea funifera</i> (d'Almeida, Aquino, and Monteiro 2006).....	37
Figura 22. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 31 μm y 68 μm : (a) Lino, (b) Ram Ram, (c) Curaua, y (d) Fibra de hoja de piña.	41
Figura 23. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 86 μm y 112 μm : (a) Kenaf, (b) Fibra de hoja de sanseveriana, (c) Jute, y (d) <i>Manicaria saccifera</i>	42
Figura 24. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 117 μm y 140 μm : (a) Abacá, (b) Sisal, y (c) Fibra de cáscara de coco.	43
Figura 25. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 795 μm y 1343 μm : (a y b) Palma de durazno, (c) Talipot, y (d) Palmira.	44
Figura 26. Sección transversal de fibras vegetales, diámetros entre 795 μm y 1343 μm : (a y b) piassaba.	45

<i>Figura 27. Microscopía electrónica de las fibras piassaba de Aphandra natalia vistas en: (a) Sección transversal de la fibra al ambiente, (b) Superficie de la fibra al ambiente, (c) Sección transversal de la fibra después de exposición alcalina, y (d) Superficie de la fibra después de exposición alcalina.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 28. Composición química de los materiales lignocelulósicos: (a) Teoría de la matriz reforzada de la estructura de la pared celular, (b) Sección corta de una microfibrilla de celulosa (regiones cristalinas, semicristalinas y amorfas), (c) Modelo esférico de la lignina, y (d) Modelo molecular de la conformación de la hemicelulosa (xiloglucano o xilano) en asociación con un microfibril de celulosa).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29. Vista esquemática de una fibra en sección transversal, que muestra la definición de ángulo microfibrilar (MFA) en la microestructura de la pared celular de la fibra vegetal y la disposición en hélice de las microfibrillas de celulosa.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 30. Efecto del agua sobre la interfaz fibra-matriz en morteros.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31. Esquema de esfuerzos mecánicos con respecto a la dirección de la carga: (a) Tracción perpendicular a la fibra, (b) Tracción paralela a la fibra, (c) Compresión perpendicular a la fibra, (d) Compresión perpendicular a la fibra, y (e) Flexión perpendicular a la fibra.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Esquema de esfuerzos mecánicos con respecto a la geometría de la grieta:(a) Fibras perpendiculares al plano de fractura “alineada normalmente”, (b) Fibras con la dirección a la propagación de la grieta “alineada en paralelo en el plano”, y (c) Fibras con la dirección de propagación de la grieta “alineado en el plano normal”.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 33. Tipos de compuestos fibrosos: (a) de forma unidireccional “fibras largas”, (b) de manera aleatoria “fibras cortas”, y (c) con disposición ortogonal “mallas ortogonales”.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 34. Fardo de Fibras piassaba de Aphandra natalia.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 35. Cemento Portland y Áridos finos: (a) Cemento “Campeón HS” Tipo II, y (b) Agregados finos “Polucir”.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 36. Materiales cementantes suplementarios (SCM): (a) Ceniza de cáscara de arroz (RHA), (b) Humo de sílice (SF), y (c) Polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (BRMF).....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 37. Sustancias adherentes: (a) Látex natural, y (b) Aceite de linaza.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 38. Proceso de obtención de BRMF: (a) Primera etapa de trituración realizada manualmente con el propósito de librar el agregado grueso de las muestras de hormigón, (b) Trituración mecánica en un molino de bolas de marca MIM (Metal Industria Morocho), (c y d) Trituración con pulverizador de discos Molino de discos vibratorio RS 200, (e) Control de peso de muestras con una balanza precisión Mettler Toledo MS3002TS/00, y (f) Deshidratación de las muestras a una temperatura de 800°C bajo dos horas en un rango de 5°C/min en una mufla de serie LN/3 35/90.....</i>	<i>99</i>

Figura 39. Proceso de obtención de RHA: (a) Cáscara de arroz (RH), (b) Calcinación en una hornilla eléctrica por 30 minutos, (c) RHA poco reactiva y con poco contenido de CO, (d y e) molienda de la RHA poco reactiva en un mortero cerámico durante 5 minutos, (f) RHA poco reactiva fina, y (g y h) Activación de la RHA a 500°C por 2 horas en una mufla de serie LN/3 35/90. 101

Figura 40. Tratamiento alcalino de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Agua destilada e Ca(OH)_2 , (b) Solución de Ca(OH)_2 concentrada al 5% en agua destilada, (c) Fibras piassaba en la solución de Ca(OH)_2 después de 24 horas, y (d) Fibras piassaba enjuagadas en agua destilada, después de la exposición alcalina, seguido, se dejaron secar a temperatura ambiente. 102

Figura 41. Tratamientos combinados entre soluciones adherente y SCM: (a) Látex natural- RHA, (b) Látex natural- SF, (c) Látex natural- BRMF, (d) Aceite de linaza- RHA, (e) Aceite de linaza- SF, y (f) Aceite de linaza- BRMF. 104

Figura 42. Determinación del contenido de humedad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Fibras piassaba en longitudes inferiores a 1cm, (b) Estufa “Member” de convección forzada, y (c) Balanza analítica “Mettler AC100 Digital” con aproximación a 0,1 mg, y (d) Desecador de laboratorio de vidrio. 106

Figura 43. Determinación de la absorción de agua de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Fibras en longitudes de 2cm, 3cm, y 4cm, y (b) Fibras sumergidas en agua destilada en viales de plástico. 108

Figura 44. Determinación de la densidad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Paquete de 10 fibras, cada paquete tiene una longitud de 5 cm, y (b) Materiales e instrumentos necesarios para el ensayo. 108

Figura 45. Determinación del grosor de las fibras piassaba de *Aphandra natalia*: (a) Micrómetro Digital FUJISAN 0-25mm/0.001mm, y (b) Fibra piassaba de 27 cm de longitud. 110

Figura 46. Esquema de la prueba a la tracción realizada a la fibras de piassaba de *Aphandra natalia*. 113

Figura 47. Mecanismo de prueba a la tracción para ensayar las fibras piassaba de *Aphandra natalia*. 114

Figura 48. Determinación de la pérdida de masa de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* en medios alcalinos: (a) Hidróxido de sodio para una solución concentrada al 1.7% en agua destilada, (b) Recipientes de vidrio para inmersión de las fibras con y sin tratamiento hasta ser pesadas, también se muestran, las soluciones adherentes y los SCM, además de las fibras de diferentes longitudes para su identificación, (c) Agua destilada para lavar las fibras y desprender los tratamientos, también se aprecian los paños para secar superficialmente las fibras, y los recipientes plásticos para contener las

<i>Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación</i>	
<i>fibras hasta ser pesadas, y (d) Balanza OHAUS DV214C, 210g/ 0.1mg, y recipientes plásticos para</i>	
<i>contener las fibras después lavado, durante la medición, y antes de aplicar nuevamente los tratamientos</i>	
.....	116
<i>Figura 49. Observación de la sección transversal y superficie de piassaba de Aphandra natalia, y</i>	
<i>observación de los daños sufridos sobre la superficie y la sección transversal de las fibras por la</i>	
<i>alcalinidad del mortero: (a) Muestra de fibras preparadas para la observación de la sección transversal</i>	
<i>de piassaba en estado natural, (b) Probeta de mortero después de ser ensayada a tracción para observar</i>	
<i>los efectos de la alcalinidad sobre la sección transversal de las fibras, (c) Muestras de fibras en estado</i>	
<i>natural y retiradas de los morteros ensayados a tracción para observar los efectos de la alcalinidad</i>	
<i>sobre sus superficies, y (d) Funcionamiento del microscopio electrónico “Andonstar V160”.....</i>	118
<i>Figura 50. Procedimiento para el estudio de la morfología de las fibras piassaba de Aphandra natalia,</i>	
<i>sin tratamiento y tratadas alcalinamente: (a, b y c) Recubrimiento de las fibras con paladio mediante</i>	
<i>pulverización catódica, y (d) Microscopio electrónico de barrido “Nova NanoSEM 450”.</i>	119
<i>Figura 51. Instrumentos empleados para el estudio de los componentes químicos de los SCM: (a y b)</i>	
<i>Analizador portátil de XRF “SI TITAN modelo 800”</i>	120
<i>Figura 52. Instrumentos empleados para estudiar la morfología de los SCM:(a y b) Microscopio</i>	
<i>Binocular Compuesto “Amscope”.</i>	121
<i>Figura 53. Instrumentos empleados para el análisis de tamaño de partícula de los SCM: (a) Serie de</i>	
<i>tamices empleados, y (b) Tamices agitados mecánicamente.</i>	123
<i>Figura 54. Determinación del pH de la solución agua – cemento, y de las soluciones agua – cemento –</i>	
<i>SCM al 30% de sustitución del cemento: (a) Cemento Portland, (b) PC- SF30%, (c) PC-RHA30%, (d)</i>	
<i>PC-BRMF30%, (e) Solución de poros de las muestras PC- SCM, (f) pHmetro manual, testo 206-ph2.</i>	
.....	125
<i>Figura 55. Determinación de la granulometría de los áridos empleados para la elaboración de los</i>	
<i>morteros de cemento Portland: (a) Muestra del árido en humedad ambiente, (b) Secado de la muestra</i>	
<i>con un horno de banco para laboratorio “Humboldt H-30145”, (c) Determinación de masas con una</i>	
<i>balanza “SHS inside super hybrid sensor FX-5000” de precisión 0.01 g, (d) Agitado de las muestras con</i>	
<i>un cribador para tamices “Ro- Tap, Testing Sieve Shaker/ Model B”.</i>	128
<i>Figura 56. Disposición longitudinal de las fibras en las probetas de mortero: (a) vista en sección de</i>	
<i>planta, y (b) vista en sección transversal.....</i>	129
<i>Figura 57. Elaboración y curado de las probetas: (a) Mezcla, (b y c) Colocación y compactación de la</i>	
<i>mezcla en moldes, y (d) Curado del mortero fibroso por 28 días.....</i>	130

Figura 58. Desarrollo de ensayos para determinar las propiedades físicas de los morteros endurecidos: (a y b) Pruebas de absorción de agua por inmersión, y (c) Pruebas de absorción de agua por capilaridad.	134
---	-----

Figura 59. Materiales e instrumentos necesarios para determinar las propiedades físicas de los morteros endurecidos: (a) Probetas de mortero endurecido, agua destilada (para pruebas de densidad), soporte universal, y balanza de laboratorio “US Solid 500x0.001g 1 mg”, y (b) Horno eléctrico de secado.	135
--	-----

Figura 60. Desarrollo de ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los morteros endurecidos: (a) Preparación de las muestras antes de ser ensayadas, (b) Probetas en posición para iniciar el ensayo, (c) Máquina de prueba universal “SHIMADZU CONCRETE 2000X”, y (d) Software de prueba de materiales “TRAPEZIUM X”.	137
---	-----

Figura 61. Determinación del pH de la solución de poros de los polvos de morteros reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia: (a) Morteros con fibras sin tratar, tratadas con hidróxido de calcio, y con diferentes recubrimientos a base de agentes hidrófugos – SCM, (b y c) Polvo de mortero triturado de cada muestra, y (d) Medición del pH con pHmetro manual testo 206-ph2.	139
---	-----

Figura 62. Densidad de un paquete de fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes contenidos de humedad: (a) A temperatura ambiente o contenido de humedad de 12.63%, y (b) Tras 24 horas de saturación en agua destilada o contenido de humedad de 22.62%.	146
---	-----

Figura 63. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con NRL–RHA en relación a F–Sin_Tratar y T–Ca(OH) ₂ .	158
--	-----

Figura 64. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con NRL–SF en relación a F–Sin_Tratar y T–Ca(OH) ₂ .	159
---	-----

Figura 65. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con NRL–BRMF en relación a F–Sin_Tratar y T–Ca(OH) ₂ .	160
---	-----

Figura 66. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con LO–RHA en relación a F–Sin_Tratar y T–Ca(OH) ₂ .	161
---	-----

Figura 67. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con LO–SF en relación a F–Sin_Tratar y T–Ca(OH) ₂ .	162
--	-----

Figura 68. Pérdida de masa (%) de las fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con LO–BRMF en relación a F–Sin_Tratar y T–Ca(OH) ₂ .	163
--	-----

Figura 69. Microscopía óptica de los SCM: (a) RHA, (b) SF, y (c) BRMF.	166
--	-----

<i>Figura 70. Evolución del pH del cemento portland (PC) sustituido parcialmente en un 30% por RHA (PC-RHA 30%).</i>	<i>169</i>
<i>Figura 71. Evolución del pH del cemento portland (PC) sustituido parcialmente en un 30% por SF (PC-SF 30%).</i>	<i>170</i>
<i>Figura 72. Evolución del pH del cemento portland (PC) sustituido parcialmente en un 30% por BRMF (PC-BRMF30%).</i>	<i>171</i>
<i>Figura 73. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia tratadas con hidróxido de calcio (MF_T-Ca(OH)₂) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>176</i>
<i>Figura 74. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz (MF_NRL-RHA) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>177</i>
<i>Figura 75. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice (MF_NRL-SF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>178</i>
<i>Figura 76. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_NRL-BRMF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>179</i>
<i>Figura 77. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz (MF_LO-RHA) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>180</i>
<i>Figura 78. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice (MF_LO-SF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>181</i>
<i>Figura 79. Capilaridad de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_LO-BRMF) en comparación con morteros sin fibras (M_TES) y morteros con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar).</i>	<i>182</i>
<i>Figura 80. Densidad aparente (g/cm³) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos.</i>	<i>184</i>
<i>Figura 81. Absorción de agua (%) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos.</i>	<i>185</i>

<i>Figura 82. Porosidad abierta (%) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos.</i>	<i>186</i>
<i>Figura 83. Resistencia a la flexión (MPa) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos.</i>	<i>188</i>
<i>Figura 84. Módulo de Young (MPa) de morteros de cemento endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos.</i>	<i>189</i>
<i>Figura 85. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia tratadas con hidróxido de calcio (MF_T-Ca(OH)₂) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>192</i>
<i>Figura 86. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de látex de caucho natural y ceniza de cáscara de arroz (MF_NRL–RHA) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>193</i>
<i>Figura 87. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de látex de caucho natural y humo de sílice (MF_NRL–SF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>194</i>
<i>Figura 88. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de látex de caucho natural y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (MF_NRL–BRMF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>195</i>
<i>Figura 89. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de aceite de linaza y ceniza de cáscara de arroz (MF_LO–RHA) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>196</i>
<i>Figura 90. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de aceite de linaza y humo de sílice (MF_LO–SF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>197</i>
<i>Figura 91. Solución de poros de morteros endurecidos reforzados con fibras piassaba de Aphandra natalia recubiertas con una capa de aceite de linaza y polvo fino de mortero de cemento reciclado</i>	

<i>Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación calcinado (MF_LO-BRMF) triturados, en comparación con morteros de cemento sin fibras (M_TES) triturados, y morteros de cemento con fibras sin tratar (MF – Sin_Tratar) triturados.</i>	<i>198</i>
<i>Figura 92. Histograma de frecuencia considerando 6 intervalos de grosores.</i>	<i>200</i>
<i>Figura 93. Media aritmética de los grosores de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción en los diferentes rangos de frecuencia.</i>	<i>201</i>
<i>Figura 94. Media aritmética de las áreas de la sección transversal en el plano de fractura de las fibras ensayadas a tracción en los diferentes rangos de frecuencia.</i>	<i>202</i>
<i>Figura 95. Microestructura de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	<i>205</i>
<i>Figura 96. Ampliación de la médula de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	<i>206</i>
<i>Figura 97. Ampliación del sistema del tejido vascular de las fibras piassaba de Aphandra natalia. ..</i>	<i>207</i>
<i>Figura 98. Microestructura de fibras piassaba de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor: (a) Microestructura completa de una fibra de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm de la que se desprende una fibra de grosor entre 0.10 mm y 0.19 (b) Microestructura fragmentada de una fibra de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm, (c) Microestructura completa de una fibra de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm. (d) Microestructura fragmentada de una fibra de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm. (e) Microestructura completa de una fibra de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm. (f) Microestructura fragmentada de una fibra de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.</i>	<i>208</i>
<i>Figura 99. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm.</i>	<i>209</i>
<i>Figura 100. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.20 mm y 0.29 mm.</i>	<i>210</i>
<i>Figura 101. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm.</i>	<i>211</i>
<i>Figura 102. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.</i>	<i>212</i>
<i>Figura 103. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.50 mm y 0.59 mm.</i>	<i>213</i>
<i>Figura 104. Perfil de la sección transversal y el área de cada fibra en el plano de fractura de las fibras dentro del rango de grosor entre 0.60 mm y 0.70 mm.</i>	<i>214</i>
<i>Figura 105. Hendiduras de la médula sobre la superficie de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	<i>216</i>

<i>Figura 106. Grieta en hendidura de la médula sobre la superficie de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	217
<i>Figura 107. Protuberancias espinulosas sobre la superficie de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	218
<i>Figura 108. Vista ampliada de las protuberancias espinulosas sobre la superficie de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	219
<i>Figura 109. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de Aphandra natalia para el intervalo de grosor de 0.10 mm a 0.19 mm.</i>	221
<i>Figura 110. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de Aphandra natalia para el intervalo de grosor de 0.20 mm a 0.29 mm.</i>	222
<i>Figura 111. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de Aphandra natalia para el intervalo de grosor de 0.30 mm a 0.39 mm.</i>	223
<i>Figura 112. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de Aphandra natalia para el intervalo de grosor de 0.40 mm a 0.49 mm.</i>	224
<i>Figura 113. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de Aphandra natalia para el intervalo de grosor de 0.50 mm a 0.59 mm.</i>	225
<i>Figura 114. Resistencia a la tracción versus deformación de las fibras de Aphandra natalia para el intervalo de grosor de 0.60 mm a 0.79 mm.</i>	226
<i>Figura 115. Tipos de fallas de las fibras piassaba de Aphandra natalia ensayadas a tracción para diferentes intervalos de grosores: (a) 0.10 mm - 0.19 mm, (b) 0.20 mm - 0.29 mm, (c) 0.30 mm - 0.39 mm, (d) 0.40 mm - 0.49 mm, (e) 0.50 mm - 0.59 mm, y (f) 0.60 mm - 0.70 mm.</i>	227
<i>Figura 116. Carga de rotura de las fibras piassaba de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	230
<i>Figura 117. Deformación de rotura de las fibras piassaba de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	231
<i>Figura 118. Resistencia a la tracción de las fibras piassaba de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	232
<i>Figura 119. Módulo de Young de las fibras piassaba de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	233

<i>Caracterización de fibras de Aphandra natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación</i>	
<i>Figura 120. Diagramas Weibull de la resistencia a la tracción de las fibras piassaba de Aphandra natalia clasificadas en diferentes rangos de grosor.....</i>	<i>241</i>
<i>Figura 121. Diagramas Weibull del módulo de Young de las fibras piassaba de Aphandra natalia clasificadas en diferentes rangos de grosor.....</i>	<i>242</i>
<i>Figura 122. Diagramas Weibull de la deformación de rotura de las fibras piassaba de Aphandra natalia clasificadas en diferentes rangos de grosor.....</i>	<i>243</i>
<i>Figura 123. Relación entre la media del grosor de las fibras y la media de los valores de la resistencia a la tracción.....</i>	<i>246</i>
<i>Figura 124. Relación entre la media del grosor de las fibras y la media de los valores del módulo de Young.</i>	<i>247</i>
<i>Figura 125. Relación entre la media del área de la sección transversal de las fibras y la media de los valores de la resistencia a la tracción.</i>	<i>248</i>
<i>Figura 126. Relación entre la media del área de la sección transversal de las fibras y la media de los valores de la resistencia a la tracción.</i>	<i>249</i>
<i>Figura 127. Contribuciones de los SCM y los impermeabilizantes o agentes adherentes sobre los morteros de cemento con fibras.</i>	<i>251</i>
<i>Figura 128. Densidades de los morteros endurecidos.</i>	<i>253</i>
<i>Figura 129. Coeficiente de absorción de agua de los morteros endurecidos.</i>	<i>254</i>
<i>Figura 130. Porosidad abierta de los morteros endurecidos.</i>	<i>255</i>
<i>Figura 131. Velocidad de ascensión capilar de los morteros endurecidos.</i>	<i>256</i>
<i>Figura 132. Resistencia a la flexión de los morteros endurecidos.</i>	<i>262</i>
<i>Figura 133. Módulo de Young de los morteros endurecidos.</i>	<i>263</i>
<i>Figura 134. pH de la solución de poros de los morteros endurecidos triturados.</i>	<i>268</i>
<i>Figura 135. pH de la solución agua – cemento Portland (PC) y de las sustituciones parciales con materiales cementantes suplementarios al 30%: ceniza de cáscara de arroz (PC-RHA 30%), humo de sílice (PC-SF 30%), y polvo fino de mortero de cemento reciclado calcinado (PC-BRMF 30%).</i>	<i>269</i>
<i>Figura 136. Pérdidas de masa de las fibras a los 28 días y 98 días con diferentes tratamientos.</i>	<i>273</i>

Figura 137. Microscopía de las fibras extraídas del mortero endurecido a 28 días de curado: (a) (MF – Sin_Tratar) sección transversal, (b) (MF – Sin_Tratar) superficie de la fibra, (c) (MF_T-Ca(OH)₂) sección transversal, (d) (MF_T-Ca(OH)₂) superficie de la fibra. 275

Figura 138. Superficie de la fibra una fibra piassaba tratada previamente con Ca(OH)₂ obtenida de la matriz de cemento a los 28 días. 276

Figura 139. Superficie de la fibra una fibra piassaba tratada previamente con Ca(OH)₂ obtenida de la matriz de cemento a los 28 días con depósitos de CH y CSH. 277

Figura 140. Microscopía de las fibras extraídas del mortero endurecido a 28 días de curado: (a) (MF_NRL-RHA) sección transversal, (b) (MF_NRL-RHA) superficie de la fibra, (c) (MF_NRL-SF) sección transversal, (d) (MF_NRL-SF) superficie de la fibra, (e) (MF_NRL-BRMF) sección transversal, (f) (MF_NRL-BRMF) superficie de la fibra. 279

Figura 141. Microscopía de las fibras extraídas del mortero endurecido a 28 días de curado: (a) (MF_LO-RHA) sección transversal, (b) (MF_LO-RHA) superficie de la fibra, (c) (MF_LO-SF) sección transversal, (d) (MF_LO-SF) superficie de la fibra, (e) (MF_LO-BRMF) sección transversal, (f) (MF_LO-BRMF) superficie de la fibra. 281

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades mecánicas de las fibras vegetales.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2. Características a la tracción de las fibras vegetales tratadas con de álcali.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 3. Composición química del cemento Portland Tipo II.</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4. Granulometría de los áridos finos.</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 5. Tratamientos aplicados a las fibras.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 6. Equivalencias aceptadas entre los tamaños nominales de las aberturas dadas en la norma INEN y las de la serie ASTM para las mallas de alambre.</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 7. Relaciones de las soluciones acuosas para la medición del pH.</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 8. Equivalencias aceptadas entre los tamaños nominales de las aberturas dadas en la norma INEN y las de la serie ASTM para las mallas de alambre.</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 9. Contenido de humedad de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 10. Absorción de agua de las fibras piassaba de Aphandra natalia.</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 11. Densidad de las fibras piassaba de Aphandra natalia a temperatura ambiente (contenido de humedad de las fibras 12.63%).</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 12. Densidad de las fibras piassaba de Aphandra natalia a temperatura ambiente (contenido de humedad de las fibras 22.62).</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 13. Características mecánicas de las fibras piassaba de Aphandra natalia para un rango de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm.</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 14. Características mecánicas de las fibras piassaba de Aphandra natalia para un rango de grosor entre 0.20 mm y 0.29 mm.</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 15. Características mecánicas de las fibras piassaba de Aphandra natalia para un rango de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm.</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 16. Características mecánicas de las fibras piassaba de Aphandra natalia para un rango de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 17. Características mecánicas de las fibras piassaba de Aphandra natalia para un rango de grosor entre 0.50 mm y 0.59 mm.</i>	<i>152</i>

<i>Tabla 18. Características mecánicas de las fibras piassaba de Aphandra natalia para un rango de grosor entre 0.60 mm y 0.70 mm.</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 19. Pérdida de masa (g) de fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos y recubrimientos en una solución alcalina de hidróxido de sodio.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 20. Pérdida de masa (%) de fibras piassaba de Aphandra natalia con diferentes tratamientos y recubrimientos en una solución alcalina de hidróxido de sodio.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 21. Composición química de los SCM.....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 22. Distribución del tamaño de partícula de los materiales cementantes suplementarios.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabla 23. Evolución del pH del cemento portland, y de las sustituciones parciales con SCM al 30%.</i>	<i>169</i>
<i>Tabla 24. Capilaridad de los morteros endurecidos a los 28 días.</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 25. Evolución del pH de los morteros de cemento portland triturados investigados.....</i>	<i>191</i>
<i>Tabla 26. Distribución de Fibras con microestructura completa y con microestructura fragmentada en diferentes rangos de grosor.....</i>	<i>239</i>
<i>Tabla 27. Parámetros Weibull de la resistencia a la tracción correspondientes a las fibras de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	<i>239</i>
<i>Tabla 28. Parámetros Weibull del módulo de Young correspondientes a las fibras de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	<i>239</i>
<i>Tabla 29. Parámetros Weibull de la deformación de rotura correspondientes a las fibras de Aphandra natalia en diferentes rangos de grosor.</i>	<i>240</i>
<i>Tabla 30. Coeficientes hiperbólicos para la relación entre la media de la resistencia a la tracción y el módulo de Young, y la media del grosor de las fibras estudiadas.</i>	<i>246</i>
<i>Tabla 31. Coeficientes hiperbólicos para la relación entre la media de la resistencia a la tracción y el módulo de Young, y la media del área de las fibras estudiadas.</i>	<i>248</i>