

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA
EL BAMBÚ COMO REFUERZO EN MATERIALES
COMPUESTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

Autor: Reinier Rodríguez Hernández

Tutora: Dra. C. Lena Mora Rodríguez

Santa Clara

2017

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mi mamá y hermana, por estar para mí siempre.

A los profes Lena y Jorge Félix por darme la oportunidad de trabajar con ellos.

A la profe Consuelo, que con sus pellizquitos me hizo llegar a donde estoy.

A Viviana (Vivi) por todas las cosas buenas y el cariño.

En especial a mis amigos Diana, Dagmara, Alejandro, Lenier (Yervilla), Ludovino (Ludo) y Rolando (Monti), por creer en mí y aguantarme todos estos años y los que vendrán.

A todos muchas gracias.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo central la conformación de bases teóricas y criterios de utilización prácticos del uso del bambú como refuerzo en materiales compuestos para la construcción. Esta necesidad se desprendió de la dispersión de los trabajos investigativos enmarcados en el tema, haciendo que su comprensión y procesamiento resultara complicado. Para el cumplimiento de la tarea, primeramente, se expusieron los principales parámetros físicos – mecánicos del bambú para lograr su caracterización como material de construcción. Seguidamente se establecieron condiciones técnicas – constructivas, propiedades físico – mecánicas del uso de fibras de bambú tanto en matrices cementicias como poliméricas. Finalmente se plantearon las principales propiedades y recomendaciones del uso de tablillas (cañas) y cables de bambú en hormigón armado en sustitución del acero de refuerzo.

Palabras claves: Bambú, materiales compuestos, fibras, refuerzo, cemento, polímeros, tablillas, cables.

Abstract

The present research had as main objective the conformation of theoretical bases and practical use criteria of the bamboo as reinforcement in composite materials for construction. This need arose from the dispersion of the existent research works regarding to the subject, making their understanding and processing complicated. For the completion of the task, first, the main physical - mechanical parameters of the bamboo were exposed to obtain its characterization as a construction material. Technical - constructive conditions and physical - mechanical properties of the use of bamboo fibers were established in both cementitious and polymeric matrices. Finally, the main properties and recommendations for the use of slats (canes) and cables of bamboo in reinforced concrete were proposed as a replacement of reinforcing steel.

Key words: Bamboo, composite materials, fibers, reinforcement, cement, polymers, splints, cables.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Introducción	1
Problema científico de la investigación	3
Objeto de estudio.....	3
Campo de Acción.....	3
Hipótesis	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
Tareas de investigación	4
Metodología general de la investigación	4
Novedad científica	5
Resultados de la investigación.....	5
Organización del informe	5
Capítulo I. Bambú como material de construcción	6
1.1 Bambú, materia prima de origen vegetal	6
1.2 Distribución.....	10
1.3 Características físico – mecánicas.....	12
1.4 Ventajas y desventajas.....	15
1.5 Materiales compuestos.....	16
1.5.1 Clasificación	18
1.5.2 Materiales compuestos fibrosos	20

1.6	Fibras naturales de origen vegetal.....	21
1.7	Bambucreto	23
1.8	Bambú, proyectos e iniciativas.....	24
1.9	Posibilidades y alternativas.....	25
1.10	Conclusiones parciales	26
Capítulo II. Fibras de bambú en materiales compuestos.....		27
2.1	Proceso de extracción de fibras.....	29
2.2	Matrices cementicias.....	34
2.2.1	Durabilidad de las fibras naturales.....	35
2.2.2	Concreto reforzado con fibras naturales	40
2.2.2.1	Consideraciones generales en el uso de fibras naturales en el concreto ...	43
2.2.3	Cenizas de hojas de bambú como material puzolánico	44
2.2.4	Aplicaciones	47
2.3	Matrices poliméricas	51
2.3.1	Consideraciones generales de materiales poliméricos fibro-reforzados.....	54
2.3.2	Materiales compuestos biodegradables reforzados con fibras	57
2.3.3	Mejoramiento interfaz matriz - fibra.....	59
2.3.4	Aplicaciones	63
2.4	Concreto polimérico.....	68
2.5	Conclusiones parciales.....	69
Capítulo III. Tablillas (cañas) y cables de bambú en hormigón armado.....		71
3.1	Colocación del refuerzo de bambú en vigas	73
3.2	Problemas en la relación bambú - hormigón.....	76
3.2.1	Absorción de agua.....	77
3.2.2	Variación dimensional.....	78

3.2.3	Adherencia	79
3.3	Principales conclusiones de investigaciones realizadas.....	82
3.4	Principios de diseño y construcción recomendados para concreto reforzado con bambú.....	83
3.5	Cables de bambú.....	84
3.6	Conclusiones parciales.....	87
Conclusiones y Recomendaciones		88
Conclusiones		88
Recomendaciones		89
Referencias bibliográficas		90

Introducción

Hoy en día, solo el 20% de la población mundial consume el 80% de las materias primas. Los países en vías de desarrollo usan cerca del 90% del cemento y 80% del acero consumido por el sector de la construcción global. Según *Future Cities Laboratory* (FCL), 70% del daño en el ambiente construido hoy es causado por la corrosión del acero dentro de las estructuras concreto - reforzadas. Con estas cifras no es posible la elevación de la calidad de vida de una gran parte de la humanidad. Por eso, los recursos deben explotarse pensando en el largo plazo; es decir, para satisfacer las necesidades actuales sin descuidar las de las generaciones futuras.

Una sociedad sustentable, no se basa solo en usar menos recursos naturales y preservar el medio ambiente. Sustentabilidad es un concepto sistémico que debe abarcar todos los campos del desarrollo humano.

La definición de diseño expresada por (Bonsiepe, 1983) lo resalta como la “actividad que se ocupa de la definición de las características funcionales, estructurales y estético - formales de productos industriales y sistemas de productos, considerando los factores técnico – económicos, técnico – productivos y socio – culturales”. Por tanto, factores económicos, tecnológicos, culturales, psicológicos, y ecológicos están intrínsecamente ligados al diseño.

Sin lugar a dudas, las llamadas economías verdes, son un peldaño fundamental para la confrontación de los problemas medioambientales, económicos y sociales que enfrenta la humanidad. Dentro de esta política, del uso racional y equitativo de los recursos de la tierra, se destaca el empleo del bambú debido a su amplia distribución en prácticamente todo el mundo a excepción de Europa, siendo los países asiáticos y tropicales los que presentan una mayor diversidad en cuanto a especies y tamaños.

Esta abundancia ha permitido que el bambú sea una materia prima ideal para innumerables usos en países principalmente asiáticos desde hace miles de años. Esto no se repite, por ejemplo, en América Latina, por un fenómeno cultural ya que en muchos lugares se considera un material ordinario que denota pobreza y mal gusto, debido principalmente a que era utilizado por comunidades rurales o personas de escasos recursos. Solo en los últimos años se ha observado un cambio en esta actitud y hoy en día se ve a este recurso como un material noble, el que puede ser utilizado para la confección de diferentes productos. (Pereira and Beraldo, 2007)

En el mundo del plástico, del concreto y del acero de hoy, el bambú aporta su centenaria contribución y crece en importancia. Los programas internacionales de cooperación técnica han reconocido las cualidades excepcionales de esta planta y se realiza un amplio intercambio de variedades y de conocimientos relativos a su empleo.

Sin embargo, el mismo está todavía muy subestimado y poco conocido en el campo de la construcción actual. Los usos más comunes son en artesanías o muebles y solo pocos lo aplican para estructuras de viviendas u obras sociales. Justamente, hoy en día se necesita el desarrollo técnico de los recursos naturales y renovables para poder construir de una manera que permita una calidad de vida a largo plazo.

Sobre esta plataforma, se desarrollan en el mundo un sinnúmero de proyectos encaminados a la producción de materiales compuestos con base de bambú. Son disímiles las formas de uso de la planta desde la utilización de sus fibras incorporadas a concretos, resinas y polímeros hasta el empleo de las cañas en sustitución del acero en hormigones armados para diversos elementos estructurales.

El bambú está aclamándose como una posible alternativa en el refuerzo. Muchas son las investigaciones que están explorando la creación de un material compuesto con refuerzo de bambú que sea libre de corrosión, ligero y más económico que el acero y que venga de un recurso renovable orgánico.

Es una planta de un increíblemente rápido crecimiento con cualidades constructivas excelentes. Es altamente resistente a la tensión. En principio, el bambú, con respecto a sus propiedades mecánico - tecnológicas, es superior a la madera e incluso al acero.

La incorporación de fibras naturales y artificiales al concreto ha tenido un auge como solución viable tanto técnica como económica pero no está exenta de dificultades debido a la alta alcalinidad de la pasta de cemento Portland, que, aunque protege a las fibras de acero de la corrosión, afecta a otros tipos de fibras deteriorándolas con el paso del tiempo como es el caso de las fibras de vidrio y las fibras naturales celulósicas. Este último ocurre por la degradación que sufre la fibra natural debida al ataque químico que con el tiempo le produce el agua alcalinizada por los elementos alcalinos contenidos en el cemento.(Gram and Hans, 1988)

El empleo del bambú como elemento de refuerzo en el concreto, en reemplazo de las varillas de acero que comúnmente se utilizan, es una de las aplicaciones más sobresalientes que este material tiene en la construcción y una de sus muchas ventajas sobre la tierra.(González Salcedo, 2001) Sin embargo, el principal problema a enfrentar es la adherencia entre las tablillas y el concreto, así como la proporción del refuerzo en función de la sección transversal del elemento a construir.

Sin duda alguna, los estudios, tanto recientes como antiguos, tienen una gran relevancia en cuanto al sector de la construcción se refieren, pero su comprensión y procesamiento resulta complicado debido a la dispersión de los trabajos investigativos. Sobre esta base se plantea:

Problema científico de la investigación

¿Será posible conformar un documento de referencia sobre la utilización del bambú como refuerzo en materiales compuestos en el que se expongan los antecedentes, peculiaridades, desventajas y recomendaciones que ofrece cada uso de la planta para la construcción?

Objeto de estudio

El bambú como refuerzo en materiales compuestos.

Campo de Acción

Contribución al estudio del bambú como refuerzo en materiales compuestos con el fin de ser usado en el sector constructivo, proyectando sus disímiles formas de utilización (fibras, tablillas o cañas, cables) en pos de garantizar un futuro económico, ecológico y sostenible.

Hipótesis

Es necesario, posible y práctico realizar un compendio de la información y su respectiva organización de los usos del bambú como refuerzo en materiales compuestos.

Objetivo General

Conformar bases teóricas y criterios de utilización prácticos del bambú y su uso como refuerzo en materiales compuestos para la construcción.

Objetivos Específicos

1. Obtener los principales parámetros físicos – mecánicos del bambú, distribución, condiciones de uso, etc. para su caracterización como material de construcción.
2. Establecer los principios técnicos – constructivos, propiedades físico – mecánicas del uso de fibras de bambú en matrices cementicias y poliméricas.
3. Plantear las principales propiedades y recomendaciones del uso de tablillas (cañas) y cables de bambú en hormigón armado en sustitución del acero de refuerzo.

Tareas de investigación

- Recopilación bibliográfica preliminar.
- Confección de reseña bibliográfica y análisis del estado del arte del tema.
- Estudio de las características físico - mecánicas generales del bambú en todas sus formas de utilización.
- Definición de los principales conceptos, propiedades y parámetros físicos - mecánicos del bambú como material compuesto en la construcción.

Metodología general de la investigación

1. Estudio teórico sobre la utilización del bambú, variante de producción, técnica de uso, propiedades y características de su comportamiento.
2. Definición de los principales conceptos, propiedades, parámetros físicos y mecánicos de los materiales a utilizar y experiencias experimentales, con el fin de evaluar el bambú técnica, económica y ecológicamente como material compuesto de refuerzo en la construcción.

Novedad científica

Logro de la recopilación de los estudios y trabajos más recientes sobre la utilización del bambú como refuerzo en materiales compuestos y su inminente impacto social, económico y ecológico en la actualidad constructiva.

Resultados de la investigación

- Metodológicos

Se presentan una serie de procedimientos que permiten realizar una caracterización genérica del material combinando técnicas de experimentación y constructivas facilitando el conocimiento de la relación entre la respuesta macro estructural del bambú y su comportamiento a nivel micro estructural.

- Técnicos

Se brinda la descripción, cuantitativa y cualitativa, así como de los parámetros a nivel micro y macro estructural del bambú como material compuesto a partir de los principales parámetros que la caracterizan.

- Prácticos

Se brindan los principales parámetros tecnológicos necesarios para la elaboración de elementos estructurales y otros a partir de la utilización del bambú como refuerzo en materiales compuestos.

Organización del informe

El presente informe posee la siguiente estructura:

- Portada
- Resumen
- Introducción
- Capítulo I: Bambú como material de construcción
- Capítulo II: Fibras de bambú en materiales compuestos
- Capítulo III: Tablillas (cañas) y cables de bambú en hormigón armado
- Conclusiones y recomendaciones
- Referencias bibliográficas

Capítulo I. Bambú como material de construcción

1.1 Bambú, materia prima de origen vegetal

Perteneciente a la familia de las gramíneas, el bambú ha acompañado al desarrollo humano desde el propio principio del desarrollo tecnológico, ofreciendo abrigo, alimento, utensilios domésticos y otros artefactos. En el continente oriental es conocida como la planta de los dos mil usos, debido a sus excelentes características físicas, químicas y mecánicas.

La guadua se ha utilizado para la construcción de edificaciones gracias a su alta relación entre resistencia y peso, y a su acelerado crecimiento. Actualmente la parte alta del bambú, llamada varillón (Figura 1.1), se descarta para usos estructurales exigentes. Esto se debe a su reducido diámetro, que limita las conexiones con los elementos por medio de pernos y genera grandes deformaciones, pero posee un porcentaje alto de fibras y bajo de lignina lo que es favorable para la extracción de fibras de refuerzo. (Estrada Mejia, 2010)

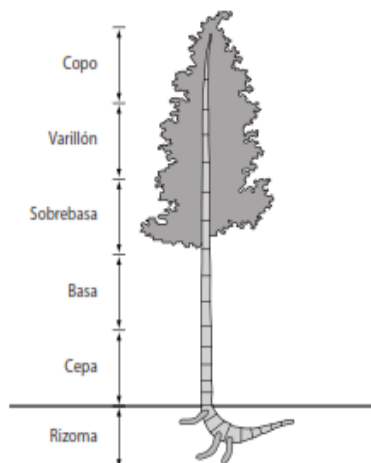


Figura 1.1 Partes de una planta de bambú. Fuente Estrada Mejia, 2010

El culmo de bambú consta de dos partes principales: los nodos y los internodos. Las células de estas dos zonas de la guadua se comportan diferente, sobre todo en su dirección, tamaño y cantidad. Así, los internodos contienen células orientadas axialmente, mientras que en los nodos se encuentran en sentido transversal, lo cual facilita el transporte de nutrientes y demás sustancias a través de las membranas nodales. En la Figura 1.2 se ilustran las partes generales de los culmos.

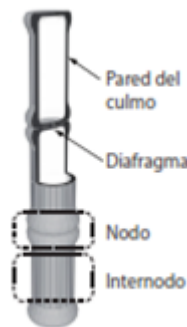


Figura 1.2 Partes generales de los culmos. Fuente Estrada Mejia, 2010

Los culmos de bambú son prácticamente cilíndricos y huecos, con dimensiones que varían según la especie, género, clima y edad, pueden llegar hasta los 30 cm de diámetro. El diámetro del bambú, como en la mayoría de las especies vegetales, decrece con la altura, sin embargo, está dividido por nudos, donde crecen las ramas y están los diafragmas transversales internos. La Figura 1.3 muestra la sección transversal de la pared del culmo y sus principales partes componentes.

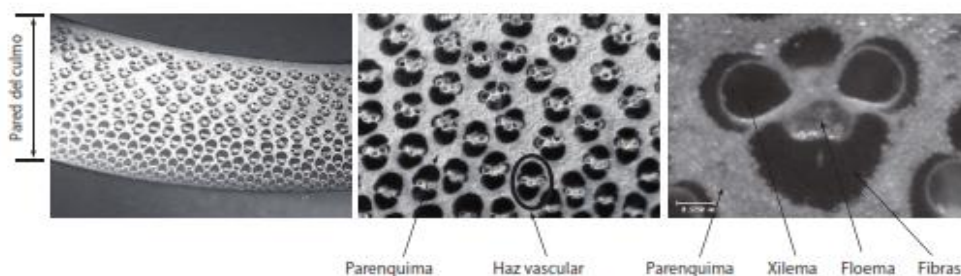


Figura 1.3 Sección transversal de la pared del culmo y sus principales partes componentes. Fuente Estrada Mejia, 2010

El tamaño, la forma y la distribución de los haces vasculares, varían en la sección transversal de la pared y a lo largo del culmo. En la pared del culmo se observa que en la

zona cercana a la cavidad central los haces vasculares son más grandes y se encuentran más separados y en la medida que se acercan a la parte exterior son de menor tamaño y están más compactos. En sentido longitudinal, debido a la reducción gradual del espesor de la pared, los haces vasculares varían en forma, tamaño y distribución de entrenudo a entrenudo.

La corteza es la parte exterior del culmo y tiene la función de proteger la parte interna e impedir el paso de agua que pueda deteriorar el tejido interno. Esta es la razón por la cual posee además de las células alargadas axialmente, propias del tejido, parejas de células cortas de corcho y sílice que le dan características de dureza e impermeabilidad. Las células de la epidermis están cubiertas además de una capa cutinizada de celulosa. (Londoño et al., 2002)

La capa interna, está compuesta de capas de células que rodean la cavidad interna de la guadua. Los haces vasculares están compuestos por el sistema conductivo (formado por dos vasos, el floema y el protoxilema), las células parenquimáticas entre los tubos que forman el sistema conductivo y los haces de fibras.

Separando los tubos que conforman el sistema conductivo, se encuentran células parenquimáticas, más pequeñas que las de la matriz, unidas al tejido conductivo mediante punteaduras pequeñas y alternadas. Aislando el sistema conductivo se encuentran los haces de fibras, formadas por cadenas de celulosa resistentes a la tensión, que garantizan que el culmo soporte adecuadamente las solicitaciones de flexión por viento y peso sin romperse.

La matriz que rodea los haces vasculares es el parénquima el cual es responsable del almacenamiento y soporte de la planta.

En la Figura 1.4 tomada de (Osorio et al., 2011) se observa la distribución de las fibras. En la Figura 1.4(a) se observa un tramo de culmo de bambú *Guadua angustifolia*, en la Figura 1.4(b) la distribución de los haces vasculares en la pared del culmo, en la Figura 1.4(c) un haz vascular compuesto por vasos (I), floema (II), protoxilema (III), parénquima (IV) y haces de fibras, en la Figura 1.4(d) el haz de fibras cercano al floema, en la Figura 1.4(e) un acercamiento de éste donde se ven las fibras elementales con forma pentagonal y hexagonal y por último se aprecia en la Figura 1.4(f) el modelo de polilamelas propuesto por Liese en 1998.

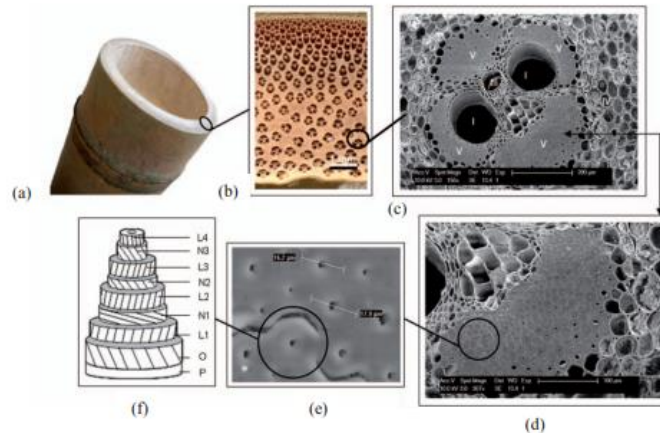


Figura 1.4 Distribución de fibras en la sección transversal de la *Guadua angustifolia* Kunth. Fuente Osorio et al., 2011

Como se observa en la Figura 1.4(c), en el haz vascular se encuentran cuatro haces de fibras, los dos primeros rodean los vasos y los otros dos se encuentran junto al floema y al protoxilema. Los haces de fibras no se tocan entre sí en la parte media e interna de la pared del culmo, mientras que en las zonas de periferia y transición se unen rodeando el tejido conductivo.

Las fibras de bambú constituyen del 40 al 50% del volumen total del culmo y del 60 al 70% del peso de la planta. Como están localizadas en los internodos, forman una capa protectora alrededor de los haces vasculares. Cerca de los nodos las fibras son cortas, mientras que hacia la zona central del internodo las fibras son largas. Además, tienen capas concéntricas de celulosa y hemicelulosa, con una orientación del tejido diferente en cada una de ellas. Estas fibras se encuentran dentro de una matriz de lignina, y los espacios entre lamelas, macrofibras, microfibras y micelas, también están ocupados por este componente. (Estrada Mejía, 2010)

Enumerando algunas propiedades que determinan el mejor uso de las especies de bambú, se encuentran:

- El porcentaje útil de los culmos, es decir, la parte del culmo donde el diámetro y la distancia entre nudos son constantes.
- El espesor de las paredes del culmo, que debe ser constante.
- Las propiedades mecánicas.
- La durabilidad natural y su preservación.

10

Las plantaciones o rodales de guadua constituyen una cobertura forestal bastante eficiente como protección de suelos en cuencas hidrográficas. Los bosquecillos traen también beneficios para las comunidades, pues además de proporcionar la infiltración de las lluvias, auxilian en el control de erosión y en la recuperación del gas carbónico de la atmósfera.

Un estudio comparativo de la producción anual de bambú con la de madera de reforestación (Pino) en t/ha fue realizado por (Janssen, 2005). En la Tabla 1.1 puede notarse que la producción de biomasa de bambú es tres veces superior a la de la madera, teniendo en consideración el propio manejo de la especie plantada.

Tabla 1.1 Comparación de la producción anual de bambú y pino (t/ha). Fuente Janssen, 2005

Producción anual (t/ha)	Verde	Seco	Verde		Seco	
	Total	Total	Culmo	Tronco	Culmo	Tronco
Bambú	78.3	47.4	55.7		36.0	
Pino	17.5	13.5		14.0		10.8
Relación Bambú/Pino	4.5	3.5	4.0		3.3	

El bambú puede crecer en suelos ácidos con baja fertilidad, puede resistir largos períodos de seca, sobrevive en asociación con el resto de la floresta y puede ser usado en la recuperación de áreas degradadas. Un programa de plantación de bambú en pequeñas y medias proporciones se puede considerar también como una solución viable para la economía local.

Se trata de un recurso sostenible y renovable porque se automultiplica vegetativamente, es decir que no necesita de semilla para reproducirse como ocurre con algunas especies maderables. Tiene además alta velocidad de crecimiento, casi 11 cm por día en óptimas condiciones y se afirma que en solo seis meses puede lograr su altura total, hechos positivos si se tiene en cuenta que uno de los problemas acusados para la siembra de especies maderables y reforestación, es el tiempo extremadamente largo para la obtención de resultados. (Varela Reyes and Chaviano, 2013)

Como recurso forestal, es una especie que permite un aprovechamiento de gran volumen en tiempos cortos, cuya maduración está entre los cuatro y cinco años, convirtiéndose en una inversión rentable que asegura un ingreso económico sostenido. La guadua es de fácil

aprovechamiento y transporte debido a su bajo peso y alta capacidad de regeneración. (González Salcedo, 2001)

El bambú se caracteriza por un bajo consumo energético para su producción. La Tabla 1.2 muestra la comparación de energía necesaria para la producción de varios materiales de construcción con sus tensiones de compresión, utilizadas en cálculos estructurales. Se percibe que para el acero resistir una misma tensión de compresión que el bambú consume 50 veces más energía.

*Tabla 1.2 Comparación de energía gastada en MJ para la producción de 1 m³ por unidad de tensión.
Fuente Hidalgo López, 1974*

Material	Bambú	Madera	Hormigón	Acero
MJ/m ³ /MPa	30	80	240	1500

1.3 Características físico – mecánicas

El bambú es un material orgánico, por tanto, es natural la variación en las propiedades de resistencia entre las especies y dentro de una misma especie. Esto ocurre dependiendo de la localización en el culmo de las muestras, siendo la parte central del culmo la mejor debido a la uniformidad de las dimensiones del diámetro. La resistencia es máxima cuando el bambú está completamente maduro.

La variación en las propiedades de resistencia de los culmos es más evidente en la dirección horizontal que en la dirección vertical. Esto ocurre debido a la alta concentración de fibras en la camada exterior del culmo y lo cual le confiere su gran resistencia superficial, en cuanto a las camadas intermedias e interior la concentración de fibras es más reducida. (Nunes, 2005)

El bambú presenta excelentes propiedades mecánicas (Tabla 1.3), influenciadas por la edad, humedad, especie, masa específica, disposición de los culmos y principalmente de sus fibras, responsables de su resistencia. (Pereira and Beraldo, 2007)

Tabla 1.3 Resistencia mecánica de algunas especies de bambú. Fuente Pereira and Beraldo, 2007

Tracción (MPa)	Compresión (MPa)	Flexión (MPa)	Cizallamiento (MPa)	Especie
135	40	108	46	<i>Dendrocalamus giganteus</i>
285	28	89	6,6	<i>Dendrocalamus asper</i>
103	27	75	56	<i>Bambusa multiplex</i>
82	27	78	41	<i>Bambusa vulgaris</i>
149	46	124	41	<i>Bambusa schrad</i>
297	34	76	9,5	<i>Bambusa arundinacea</i>
237	29	82	8	<i>Gigantochloa verticillata</i>
296	30	84	7,2	<i>Gigantochloa apus</i>
288	31	97	8,2	<i>Gigantochloa atter</i>

La buena estabilidad dimensional se presenta a medida que la humedad varía desde cero hasta la condición de saturación, en la que ocurre la entrada o salida del agua que altera el volumen del material lignoceluloso. La alteración dimensional que esta agua provoca en la madera es desigual, siendo mayor en el sentido tangencial, después en el sentido radial y finalmente en el longitudinal.

Las variaciones dimensionales de algunas especies de bambú fueron estudiadas por (Beraldo and Azzini, 2004) y concluyeron, según la Tabla 1.4, en que la exposición a un medio con humedad reducida eleva la retracción del bambú y disminuye su masa específica.

Tabla 1.4 Masa específica y variación dimensional de algunas especies de bambú. Fuente Beraldo and Azzini, 2004

Especie	Masa específica (kg/m ³)		Variaciones dimensionales (%)			
	Saturada	Seca	Radial	Tangencial	Axial	Volumétrica
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	1110	790	5.5	6.2	0.5	12.6
<i>Bambusa tuldoidea</i>	1100	660	11.7	8.9	0.4	22.2
<i>Phyllostachys pubescens</i>	1080	600	6.9	6.7	0.6	14.8

Donde: Masa específica saturada (masa saturada/volumen saturado); Masa específica seca (masa a 12% de humedad/volumen a 12% de humedad)

Debido a que no existe ningún código para la determinación de las propiedades físico – mecánicas del bambú, los distintos resultados varían en sus especificaciones y en sus valores, pero se puede concluir un promedio de resistencias mínimas de todas las investigaciones. A dichos valores todavía es necesario aplicar factores de seguridad para conocer las fuerzas admisibles. La Tabla 1.5 presenta los valores con los que más comúnmente se trabaja. (Varela Reyes and Chaviano, 2013)

Tabla 1.5 Bambú en comparación con otros materiales de construcción. Fuente Varela Reyes and Chaviano, 2013

Material	Resistencia de diseño (R) (Kg/cm ²)	Masa por volumen (M) (Kg/cm ²)	Relación de resistencia (R/M) (Kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (E) (Kg/cm ²)	Relación de rigidez (E/M) (Kg/cm ²)
Concreto	82	2400	0,032	127400	53
Acero	1630	7800	0,209	214000	274
Madera	76	600	0,127	112000	187
Bambú	102	600	0,170	203000	340

La experiencia resalta que gracias a su forma tubular el bambú tiene una esbeltez y un radio de giro muy favorables con respecto a las secciones de madera o acero con un peso igual. Resulta que el bambú resiste mucho más que la madera y en cuanto a la relación entre fuerza máxima y peso el bambú presenta un valor interesante ya que se aproxima al acero. (Varela Reyes and Chaviano, 2013) La resistencia a compresión del bambú es semejante a otras maderas y más alta cuando es medida paralelamente a sus fibras.

Los conocimientos sobre la deformación a flexión del bambú son necesarios para su utilización como refuerzo en elementos como vigas y losas. La camada interna del bambú es más frágil en comparación con la externa, siendo ésta última hasta dos veces más fuerte. Ensayos realizados indican valores medios de resistencia a tracción de 140 MPa para la capa exterior y 52 MPa para la interior. Por tanto, la porción interna de la pared del bambú puede ser retirada sin causar problemas en la resistencia del mismo.

1.4 Ventajas y desventajas

El bambú presenta en comparación con la madera una serie de ventajas. Destacan entre sus diversos beneficios su bajo costo, ligereza, posibilidades de curvatura, superficie lisa, atractivo color, resistencia a la tracción comparable con la del acero, resistencia a la compresión superior a la del hormigón y excelentes resultados en la fabricación de muebles, estructuras y otros. (Santos Delgado, 2011) Se pueden resumir las ventajas del bambú de la siguiente manera:

El bambú tiene muy buenas cualidades físicas para un material de construcción.

- Es un material liviano que permite reducir el peso a la construcción.
- Sus fibras exteriores lo hacen muy resistente a las fuerzas axiales.
- La relación entre peso - carga máxima y su forma tubular apto para fuerzas axiales, lo convierten en un material perfecto para estructuras espaciales donde trabajan solamente fuerzas axiales.
- El rápido crecimiento del bambú lo hace económicamente muy competitivo.
- La especie absorbe gran cantidad de energía y admite grandes niveles de flexión.
- Las cañas de bambú son de medidas y formas que las hacen manuales, almacenables y sistematizables, en forma conveniente y económica.
- La substancia y la textura de las cañas hace fácil la división a mano en piezas cortas (aserrándolas o cortándolas), o en tiras angostas (hendiéndolas). No se necesitan máquinas costosas, sino sólo herramientas simples.
- La superficie natural de muchos bambúes es limpia, dura y lisa, con un color atractivo.
- Los bambúes tienen poco desperdicio y ninguna corteza que eliminar.

En el contexto ecológico juega un papel muy importante.

- Es un recurso renovable y sostenible.
- Su rápido crecimiento y la alta densidad de plantas por área significa una productividad muy importante de la tierra y una biomasa considerable.
- Se utiliza como planta de reforestación.

- La manipulación del bambú desde donde crece hasta la obra necesita muy poca energía.
- Es un importante fijador de dióxido de carbono (CO₂).
- Evita la movilización de tierra y conserva efectivamente los suelos.

Aunque ya existe en algunos países mucha experiencia en el uso de la guadua y se han realizado investigaciones, todavía la guadua produce varios prejuicios, debido a que no es ni “el acero vegetal” ni “la madera de los pobres”. (Varela Reyes and Chaviano, 2013)

- Dimensiones variables: Es difícil obtener canas bien ajustadas a una medida estándar de dimensiones. Por esta causa, el proceso o fabricación en bambú no puede ser mecanizado fácilmente y generalmente su utilización queda dentro del campo del artesano.
- Superficies disparejas: El empleo de ciertos bambúes se hace difícil por la curvatura de las canas, la prominencia de los nudos, la desigualdad y la conicidad. Más marcas hacia el extremo superior de la caña, pueden hacer difícil obtener una construcción ajustada, a prueba de la intemperie y los insectos. Para superar los defectos de la desigualdad el constructor puede seleccionar los bambúes pensando en las exigencias de su empleo. Las características dominantes y las canas pueden ser clasificadas de acuerdo con tales bases. Los diversos cortes pueden separarse en grupos de acuerdo con los fines para los cuales sean más adecuados.
- Extrema hendibilidad: Con excepción de los bambúes de paredes gruesas tales como el *Bambusa tulda* y *Dendrocalamus strictus* o aquellos de madera relativamente blanda, tales como ciertas especies de Guadua, los bambúes tienen tendencia a rajarse fácilmente, tendencia que proscribire el empleo de clavos. Ello también limita el tipo de técnicas adecuadas para la construcción o unión de las unidades estructurales.

1.5 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos que están formados por dos o más materiales distintos, con el propósito de conseguir una combinación de propiedades que no sería

posible obtener únicamente con los materiales originales. A pesar de la gran variedad existente, todos se encuentran compuestos por:

- La matriz, responsable de las propiedades físicas y químicas, transmite los esfuerzos al agente reforzante, protege la superficie de los refuerzos de la abrasión mecánica, brinda cohesión al material, provee al refuerzo de una barrera contra los efectos del medio ambiente tales como la humedad.
- El agente reforzante, su geometría es fundamental a la hora de definir las propiedades mecánicas del material compuesto.

Además de la matriz y el refuerzo, existe la posibilidad de que se adicionen agentes de acoplamiento, rellenos y revestimientos, siendo su principal objetivo mejorar la superficie de la interfaz del compuesto, de tal forma que las propiedades del material se magnifiquen en lugar de verse afectadas.

Los compuestos hoy en día son el material de elección para muchas aplicaciones de ingeniería, esto se debe principalmente a que son resistentes y más livianos en comparación con otros materiales, como el aluminio y el acero, en muchas ocasiones hasta con un mejor rendimiento; lo que permite optimizar el desempeño de un producto al fabricar componentes más ligeros, logrando de esta manera ser una mayor competencia en el mercado global.

Es así que combinar propiedades como elevada resistencia mecánica, bajo peso, rigidez e incluso alta resistencia a la temperatura, no es algo trivial o imposible. (Mijangos and Serafin, 2007), (Ashby, 2011) El mercado estadounidense representa el 47% de la fabricación de materiales compuestos, seguidamente se encuentra Europa con un 28%, Asia con 23% y por último América del Sur con un 2%. (Béguin, 2011)

La aplicación de materiales compuestos con fines estructurales en obras civiles comienza a ser relevante en la última década, ya que anteriormente su presencia en este campo ha sido casi inexistente. Hallan su aplicación en la industria de la construcción en estructuras sometidas a la acción de ambientes agresivos, partes de plataformas *offshore*, depósitos, anclajes al terreno, construcciones no conductivas y no magnéticas, refuerzos de estructuras, armaduras pasivas, armaduras activas, cables, tableros para pasarelas, perfilería y recubrimientos de túneles. (Oller, 2003) Así mismo, existen otros sectores en los cuales la aplicación de materiales compuestos es común. (Figura 1.5)

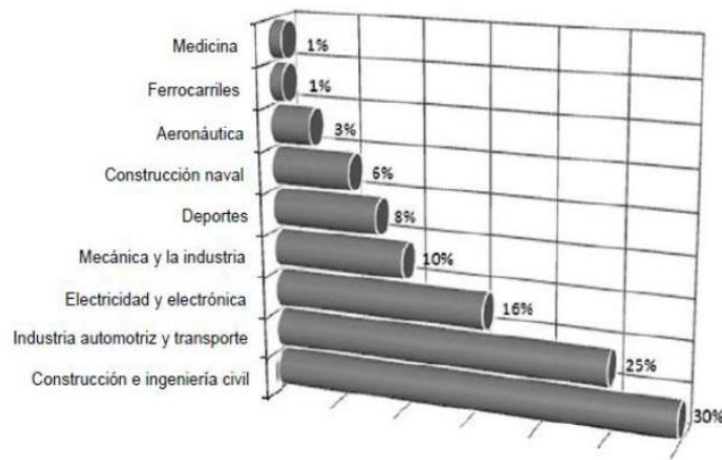


Figura 1.5 Sectores de aplicación más comunes de materiales compuestos. Fuente (Guerrero et al., 2011)

Entre las principales desventajas que presentan los materiales compuestos es posible mencionar:

- Los materiales presentan en general un comportamiento no lineal aun para tensiones muy bajas
- Al concluir el proceso de fabricación del material compuesto, este suele presentar tensiones residuales muy difíciles de cuantificar debido a las variaciones de temperatura

Los materiales de refuerzo en un compuesto (fibras, partículas), generalmente cambian sus propiedades mecánicas por influencia del medio ambiente.

1.5.1 Clasificación

Según (Callister, 2007), los materiales compuestos con fines estructurales se pueden clasificar tal como muestra la Figura 1.6.

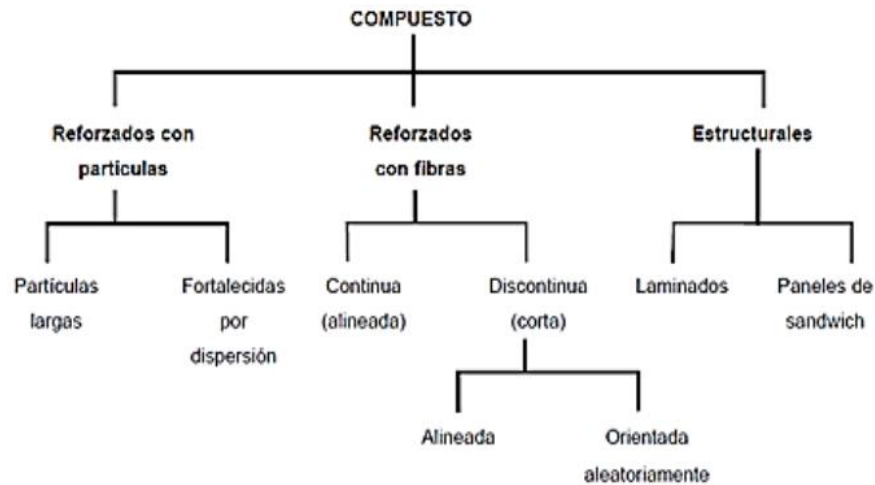


Figura 1.6 Clasificación de los materiales compuestos. Fuente Callister, 2007

Los materiales compuestos pueden también clasificarse según el tipo y forma en que están constituidos:

- Fibrosos: Compuestos por fibras continuas cortas o largas, en una dos o tres direcciones, o bien distribuidas en forma aleatoria aglutinadas por una matriz. A su vez esta matriz puede estar formada por dos o más materiales.
- Particulados: Formados por partículas que puntualmente trabajan aglutinadas por una matriz.
- Laminares: Compuestos por capas o constituyentes laminares con características de resistencia en magnitud y dirección diferentes.
- Hojuelados: Compuestos por hojuelas planas inmersas en una matriz.
- Relleno esqueleto: formado por un esqueleto relleno por otro material.

Los más utilizados son los fibrosos, en los cuales las fibras asumen el papel de resistir las acciones mecánicas y la matriz sirve como aglutinante y protector del medio ambiente. La resistencia mecánica de las fibras es del orden de 25 a 50 veces mayor que la matriz. En el caso del hormigón a tracción esta relación es del orden de 100 veces. Esto provoca un comportamiento fuertemente anisótropo. (Oller, 2003)

Desde el punto de vista del estudio del comportamiento mecánico, los materiales compuestos pueden clasificarse según su:

- Estructura básica. En este caso se considera en la clasificación la estructura a nivel de las moléculas singulares o mallas cristalinas.
- Estructura microscópica. Se tiene en cuenta para la clasificación la interacción fibra - matriz, su influencia en la distribución de tensiones y la aparición de fallas, discontinuidades o fisuras bajo condiciones de cargas elementales.
- Estructura macroscópica. Se considera en la clasificación al material compuesto desde un punto de vista macroscópico, como una combinación de sustancias diferentes, que contribuyen al estado de equilibrio del conjunto.

1.5.2 Materiales compuestos fibrosos

El componente más comúnmente utilizado es en forma de partículas o en forma de fibras. En el primero de los casos las partículas de un material o materiales específicos están adheridas entre sí mediante una matriz continua con bajo módulo de elasticidad. En compuestos fibrosos el refuerzo puede orientarse en la dirección que sea necesaria para proporcionar resistencia y rigidez óptimas. Gracias a la moldeabilidad del material pueden seleccionarse las formas estructurales que se consideren más efectivas. (Oller, 2003)

Los materiales compuestos fibrosos son los más conocidos por sus altas prestaciones mecánicas y el alto valor añadido del material final. Las propiedades mecánicas del material variarán según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material, las cuales se pueden encontrar uniaxialmente ordenadas, parcialmente ordenadas o completamente desordenadas. Al diseñar este tipo de materiales se debe tener en cuenta la relación de forma, la cantidad de fibra y su orientación, así como las propiedades de las fibras y de las matrices. (Sabanés Hernández, 2013)

El uso de materiales compuestos con fibras naturales se puede dividir en varios grupos. El primer grupo está conformado por las aplicaciones de la fibra natural en paneles como tableros de partículas, fibras y de aislamiento con un material aglutinante orgánico como la lignina y el tanino, el segundo grupo es el uso de la fibra natural unida con materiales aglutinantes inorgánicos, el tercer grupo es el uso de fibras naturales como refuerzo en matrices poliméricas como termoplásticos, termoestables y cauchos, y el último grupo es el tipo textil no tejido de fibras naturales. (Valarezo Jaramillo, 2013)

Los materiales compuestos reforzado con fibras naturales representan una forma de reciclar residuos, que es de gran interés energético y económico para los países en desarrollo. El desarrollo de materiales compuestos a partir de fibras naturales o biocompuestos, está asociado a una necesidad, desde distintos sectores de la industria, de limitar el uso de recursos no renovables.

Representan un campo de innovación para el diseño de materiales y productos, vinculado a un desarrollo sustentable, ya que en algunos casos se utilizan fibras naturales desechadas de procesos productivos a escala industrial y semi industrial. También generan un aprovechamiento de recursos renovables y locales, ampliando el campo de aplicación de las actividades agrícolas. Sus aplicaciones son variadas y van desde la industria aeroespacial, mobiliaria, automotriz hasta los geotextiles biodegradables y materiales para la construcción. (Sabanés Hernández, 2013)

1.6 Fibras naturales de origen vegetal

Los trabajos de investigación en el campo de las fibras naturales como refuerzo de hormigones, morteros y polímeros han estado muy determinados por las fibras propias que posee cada país, totalmente con carácter local. (Macías Mesa et al., 2009)

La literatura reporta más de 40 países, que, de una forma u otra, usan fibras orgánicas en el proceso constructivo. En la Tabla 1.6 se figuran a manera de resumen algunos de estos países.

Tabla 1.6 Utilización de fibras naturales. Fuente Macías Mesa et al., 2009

País	Fibras más utilizadas
Australia	Coco, bambú, celulosa, algodón
Bangladesh	Bambú
Brasil	Bambú
República Dominicana	Sisal
México	Henequén, maguey, lechuguilla
Colombia	Bambú
Cuba	Henequén

Los países desarrollados, en especial Gran Bretaña y Suecia, han llevado a cabo las investigaciones fundamentales del uso de fibras orgánicas en países tercermundistas, que son las que las poseen mayoritariamente. Destacan los institutos de investigación *IT Building Materials Workshop* de Gran Bretaña y el *Swedish Cement and Concrete Research Institute* de Suecia. (Macías Mesa et al., 2009)

Materiales reforzados con fibras naturales se pueden obtener a un bajo costo usando la mano de obra disponible en la localidad y las técnicas adecuadas para su obtención. Estas fibras son llamadas típicamente fibras naturales no procesadas. Sin embargo, las fibras naturales pueden ser procesadas químicamente para mejorar sus propiedades, generalmente son fibras derivadas de la madera. Estos procesos son altamente industrializados y no se dispone en los países en desarrollo. A tales fibras se les conoce como fibras naturales procesadas. (Juárez Alvarado et al., 2004)

Aunque históricamente muchas fibras han sido usadas para reforzar varios materiales de construcción, ha sido hasta años recientes que los científicos se han dedicado a estudiar a las fibras naturales como refuerzo, ya que anteriormente su uso se limitaba exclusivamente a la producción de ropa, colchones y cobijas.

A finales de los años 60, se llevó a cabo en varios países una evaluación sistemática de las propiedades de ingeniería de las fibras naturales y de los compuestos formados por estas fibras con el cemento. Los resultados de las investigaciones indican que las fibras pueden ser usadas con éxito para fabricar materiales de construcción. Posteriormente se desarrollaron procesos de manufactura apropiados para la producción comercial en varios países de América Central, África y Asia. (Juárez Alvarado et al., 2004)

Los productos hechos con cemento portland y fibras naturales no procesadas tal como el sisal, coco, caña de azúcar, bambú, yute, madera etc., se han probado para determinar sus propiedades de ingeniería y su posible uso en la construcción en al menos 40 diferentes países. (Juárez Alvarado et al., 2004)

Aunque los resultados fueron alentadores, se encontraron algunas deficiencias respecto a su durabilidad. Estas deficiencias al parecer son resultado de la reacción entre la alcalinidad de la pasta de cemento y las fibras, además de la susceptibilidad al ataque de microorganismos en presencia de la humedad. (Juárez Alvarado et al., 2004)

Cualquiera que sea el tipo de fibra estas les brindan a los nuevos materiales un refuerzo tridimensional que implica mejoras en las propiedades del elemento resultante. Las propiedades fundamentales que mejoran están asociadas a la resistencia a la tracción, así como la eliminación, casi total, de la fisuración y se busca que los elementos constructivos resultantes tengan un balance satisfactorio entre las propiedades mecánicas obtenidas y el costo de fabricación. (Macías Mesa et al., 2009)

1.7 Bambucreto

La producción del bambucreto es una alternativa prometedora para las construcciones a un bajo costo. El empleo del bambú como elemento de refuerzo en el concreto, en reemplazo de las varillas de acero que comúnmente se utilizan, es una de las aplicaciones más sobresalientes que este material tiene en la construcción.

La posibilidad de utilizar bambú como un refuerzo adecuado para estructuras, temporales o rurales, ha sido estudiado profundamente en los últimos 40 años. No obstante, es importante profundizar en los diseños de hormigones reforzados con bambú, máxime cuando se ha comprobado que pueden desarrollar entre dos y cuatro veces la capacidad portante a flexión de elementos no reforzados de iguales dimensiones. (Macías Mesa et al., 2009)

Durante la Segunda Guerra Mundial las fuerzas armadas de Estados Unidos y Japón utilizaron el bambú como refuerzo de hormigones, sustituyendo o disminuyendo, el empleo del acero. Este empleo ha continuado en un contexto más amplio y como meta generalmente deseable de mejorar y desarrollar técnicas constructivas basadas en materiales locales disponibles. (Macías Mesa et al., 2009)

Un cable hecho con cintas de bambú tiene mayor resistencia a la tracción que una tablilla de igual área transversal. La adherencia de los cables de bambú con el concreto es mayor que la de las tablillas debido a las entrantes y salientes que forman las cintas. No es necesario aplicar algún tratamiento impermeabilizante a los cables de bambú, pero sí de inmunización para prolongar su vida hasta 60 años. (González Salcedo, 2001)

Los principales problemas en el empleo del bambú como refuerzo son: el bajo módulo de elasticidad, su baja adherencia al hormigón, sus limitados rangos de diámetros y las

longitudes utilizables de la caña y sobre todo la amplia variabilidad del contenido de humedad.

Desde el punto de vista ecológico, el bambú consume menos energía. Investigaciones de la Asociación Brasileña en Materiales y Tecnologías No Convencionales (ABMTENC) sobre el consumo energético y el impacto ambiental de diferentes materiales y otros alternativos, presentan resultados positivos en pruebas de desarrollo con bambú como sustituto del acero en estructuras de losas, vigas y columnas de concreto.

1.8 Bambú, proyectos e iniciativas

Existen varias iniciativas y proyectos respecto al bambú en todo el mundo. Eventos y cursos sobre los diversos tipos de aplicación del bambú se desarrollan regularmente en el mundo entero y varias sociedades internacionales se dedican al estudio, conocimiento y divulgación del bambú. (Santos Delgado, 2011)

Según datos del Grupo Bambú Brasil, un grupo de discusión de la Internet que tiene un interés en incentivar y mantener el uso del bambú, existen grupos en el mundo entero trabajando en investigaciones con este fin. Por ejemplo, se puede citar la creación de IBA (*Internacional Bamboo Association*) que tiene como propósito unificar las asociaciones de todo el mundo. La ABS (*American Bamboo Society*) que viene desarrollando su trabajo hace ya un tiempo con resultados positivos, o BIM (*Bamboo Identification Manual*) herramienta *on-line* para la identificación de especies. La EBS (*European Bamboo Society*) y su similar grupo americano, con sus diversos capítulos divididos entre los países. En Australia, la *Bamboo Society of Australia* congrega a muchos de los entusiastas australianos. Actualmente el grupo de discusión *Bamboo Plantations* aborda cuestiones de punta con la participación de especialistas.

Asia cuenta con la Sociedad India de Bambú, la Sociedad China de Bambú, la Sociedad Japonesa de Bambú y la Sociedad Filipina de Bambú. En China existe el *China Bamboo Research Center*, un centro nacional que desarrolla investigaciones sobre las 1 250 especies existentes. China se destaca por la exploración, fabricación y comercialización de productos que tienen al bambú como materia prima. El principal foco de actuación en Asia es INBAR (*International Network for Bamboo and Rattan*), institución de investigación y gerencia en el

desarrollo de programas sociales que utilizan el bambú. Ya existen muchos países miembros en Asia y en Las Américas.

En América del Sur está la ECUABAMBU en Ecuador, y en Colombia, la Sociedad Colombiana de Bambú. En América Central Costa Rica cuenta con la FUNBAMBU, fundación creada para manejar el Proyecto nacional del país. Está también la AMEB (Asociación Mexicana de Bambú) y la ASOBAMBU de Guatemala. Brasil cuenta con la ABMTENC que investiga los usos de materiales de construcción alternativos, siendo el bambú un material de vanguardia.

1.9 Posibilidades y alternativas

El bambú puede ser una alternativa viable de material sustentable para la aplicación en la industria de diseño. Un ejemplo a ser citado es el trabajo de (Biswas and Satapathy, 2010) en el cual un estudio comparativo entre fibras de vidrio y de bambú en compuestos de resina epoxi mostró que el compuesto con bambú presentaba propiedades mecánicas inferiores, sin embargo, el desgaste por erosión fue menor. Citado por (Santos Delgado, 2011)

El desempeño de las fibras de bambú también fue probado en compuestos con matriz de resina poliéster. En este caso fue demostrado el excelente desempeño del bambú tanto en pruebas de tracción como en pruebas de flexión.

Otro ejemplo es el estudio hecho por (Liu et al., 2008) que se basó en la extracción de nanos cristales de fibras de bambú, investigando la morfología y la estructura de estos cristales y su combinación con una matriz de almidón para formar un compuesto. Los resultados demostraron que los cristales de fibra de bambú presentan una mayor eficiencia para el refuerzo del almidón plastificado. La resistencia a tracción y el Modulo de Young del compuesto fueron muy superiores a su homólogo glicerol plastificado, sin cristales.

Investigaciones de la UNESP –Bauru/SP realizaron pruebas con un prototipo de bambú laminado colado y pudieron constatar la eficiencia y las posibilidades de conformación, como curvaturas y fabricación de compuestos de bambú con alta resistencia mecánica y excelentes cualidades estéticas.

1.10 Conclusiones parciales

1. El bambú permite el aprovechamiento de un gran volumen de biomasa en un período relativamente corto de tiempo, de cuatro a cinco años.
2. Las propiedades mecánicas del bambú son influenciadas por la edad, especie, masa específica, disposición de los culmos y principalmente de sus fibras.
3. Productos compuestos a base de fibras naturales han sido estudiados para determinar sus propiedades y potenciales usos en la construcción en más de 40 países.

Capítulo II. Fibras de bambú en materiales compuestos

El uso de las fibras vegetales en la industria de la construcción representa un desafío interesante, sobre todo en los países en desarrollo, por ser consideradas un tipo de refuerzo económico y bastante accesible. Este tipo de fibras solo requieren un bajo grado de industrialización para ser procesadas y en comparación con las fibras de refuerzo sintéticas, la energía utilizada para su producción es pequeña y, por lo tanto, el costo de fabricación es también bajo. (Toledo Filho et al., 2009)

El propósito de las fibras de refuerzo es mejorar las propiedades mecánicas de un material de construcción, ya que de otra manera serían inadecuados para aplicaciones prácticas. La principal ventaja de reforzar con fibras materiales frágiles como las pastas de cemento, morteros, hormigones o polímeros, es el comportamiento que se obtiene del material compuesto después de la rotura de la matriz. La resistencia posterior a la rotura, que brindan las fibras, podría permitir un uso más intensivo de estos materiales en el ámbito de la construcción. (Agopyan et al., 2005)

Las fibras naturales presentan numerosas ventajas cuando se comparan con sus homólogas sintéticas, pues no sólo son un recurso renovable y biodegradable, sino que se encuentran en abundancia. Diversos autores han demostrado que las fibras naturales tienen propiedades mecánicas satisfactorias para ser utilizadas como refuerzo de diferentes materiales (Figura 2.1). En particular, el bambú se considera el último recurso vegetal sostenible que no ha sido masivamente explotado. (Estrada Mejia et al., 2010)

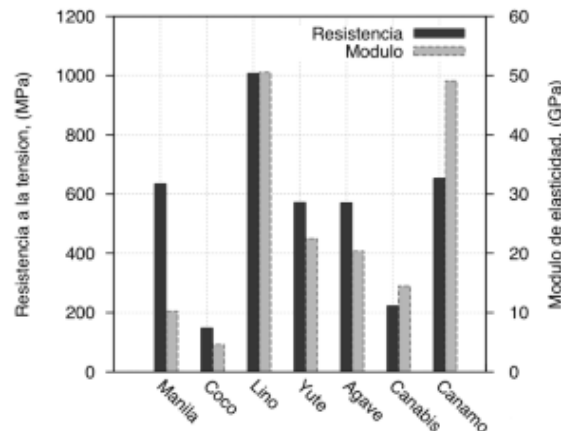


Figura 2.1 Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales. Fuente Estrada Mejia, 2010

El mayor problema que presenta de este tipo de fibras es su durabilidad en medios alcalinos, particularmente en las matrices de cemento. En cuanto a su resistencia a la rotura, se aprecia que el refuerzo de matrices de cemento con este tipo de fibras proporciona mejoras al material, así como un incremento en la energía absorbida que justificaría su uso para elementos que requirieran resistencia al impacto. (Sabanés Hernández, 2013)

Además de ser capaces de reemplazar a las fibras de vidrio y rellenos minerales, estimulan la vinculación entre ciencia, tecnología y diseño en el desarrollo de productos con beneficios socio - económicos, fomentando una cultura del diseño sustentable. La Tabla 2.1 resume las ventajas y desventajas de utilizar fibras naturales como refuerzo.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras naturales como refuerzo. Fuente (Baillie, 2004)

Ventajas	Desventajas
Sustentabilidad	Baja resistencia al agua
Generan un bajo consumo de CO ₂	Alta absorción de agua
Son biodegradables	Baja estabilidad dimensional
Requieren bajo consumo de energía	Pobre interfaz
No quedan residuos tóxicos al quemarlas	Dureza
Baja densidad	Dificultad en su procesamiento
Buenas propiedades mecánicas	Calidad heterogénea
No son tóxicas ni abrasivas	Demanda de ciclos de suministro de variables
Bajo costo	Alta flamabilidad

2.1 Proceso de extracción de fibras

En la sede de Manizales de la Universidad Nacional de Colombia se realizó un estudio con haces de fibra de *Guadua angustifolia* para caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas, en el cual se reportó que esta especie de bambú posee una resistencia a la tensión que varía entre 512 y 769 MPa y un módulo de Young que oscila entre 25 y 29 GPa. Estos resultados son alentadores pero incompletos, pues los autores no describieron el proceso de extracción de fibras, lo cual es importante dado que los métodos de extracción afectan de diferentes maneras a las propiedades mecánicas de las fibras (Tabla 2.2) (Estrada Mejia et al., 2010)

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de haces de fibras de bambú. Fuente Estrada Mejia et al., 2010

σ (MPa)	E (GPa)	Referencia
370.1 – 644.8	27	(Deshpande Abhijit et al., 2000)
441	35.9	(Okubo et al., 2004)
600	46	(Ray et al., 2004)
341 – 503	19.67 – 35.91	(Rao et al., 2007)
512 – 769	25.08 – 29.20	(Moreno et al., 2006)
50 – 220	15 – 8	(Das and Chakraborty, 2007)

Existen diferentes técnicas de extracción de fibras naturales, como los procesos mecánicos, semi mecánicos, químico - mecánicos, termo - mecánicos y químicos. Los primeros dos métodos proporcionan fibras muy cortas y mecánicamente deterioradas, mientras que los dos últimos permiten obtener fibras más largas y no afectan excesivamente las propiedades mecánicas de la pulpa (fibras) resultante. (Rydholm, 1965) La selección del proceso más adecuado de extracción de las fibras depende del material que se esté tratando, la disponibilidad de los equipos, laboratorios, reactivos y medios de seguridad del personal; y la integridad requerida de las fibras, dependiendo del uso que se les vaya a dar. (Estrada Mejia et al., 2010)

- Proceso mecánico

El proceso mecánico consiste en extraer las fibras de materiales generalmente blandos como el plátano. Suele ser un proceso poco eficiente ya que se dañan las fibras y no se

separan bien los componentes desechables. Puede realizarse de manera manual, por enriado o por descortezado. (Estrada Mejia, 2010)

La manera manual se efectúa a partir del corte del elemento de donde se obtendrán las fibras, luego estas pasan a un proceso de cepillado mediante una cardadora metálica que permite separar las fibras con el resto de los componentes, se termina con un proceso de limpieza y secado. El método de extracción mecánica por enriado consiste en la extracción de las fibras sumergidas en agua, una vez suavizadas las mismas se las golpea y se las vuelve a mojar y el secado se puede realizar luego de cinco o 13 días. Posteriormente se realiza una extracción con la cardadora para finalmente golpearlas y dejarlas secar. El método de descortezado se realiza con una descortezadora, después de pasar por este elemento la fibra pasa a ser lavada y secada. (Bonilla, 2009)

- Proceso biológico

En el proceso biológico se utiliza la producción de enzimas de diferentes organismos (como bacterias) para descomponer la lignina adherida a las fibras. El proceso suele durar de dos a tres semanas, aunque es posible obtener fibras en menor tiempo si se mantiene la materia prima en un ambiente cálido y húmedo. Debido a que requiere grandes cantidades de agua, se considera un proceso ineficiente en comparación con los demás métodos. Además, el agua contiene microorganismos que pueden afectar el procedimiento de separación de fibras, produciendo problemas como más demora, rotura de las fibras y afectación de sus propiedades, entre otros. (Rowell, 2008)

- Proceso químico

El principio de los procesos químicos es separar los tres componentes principales de la materia prima vegetal, es decir, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. En la práctica, son efectivos para eliminar la mayor parte de la lignina, pero también degradan cierta cantidad de celulosa, de manera que las fibras resultantes del proceso no corresponden al total del material fibroso original en la planta (se obtiene entre el 40 y 50% del material fibroso, aproximadamente). Este procedimiento es muy complejo en términos químicos, puesto que la lignina es insoluble en todos los solventes y, por lo tanto, no se puede disolver directamente, sino que se deben romper los enlaces covalentes que la unen con la hemicelulosa. (Morán et al., 2008) La destrucción de los enlaces se efectúa gracias a una

solución química conocida como “licor blanco” y el líquido resultante de la digestión química se llama “licor negro”, el cual es considerado un residuo peligroso por su alto contenido de reactivos, lignina, hemicelulosa, celulosa y resinas. Sin embargo, se puede tratar por medio de un proceso de combustión en un horno de recuperación. El ciclo de recuperación consta de tres procesos principales, que se resumen en la Figura 2.2. (Estrada Mejia, 2010)

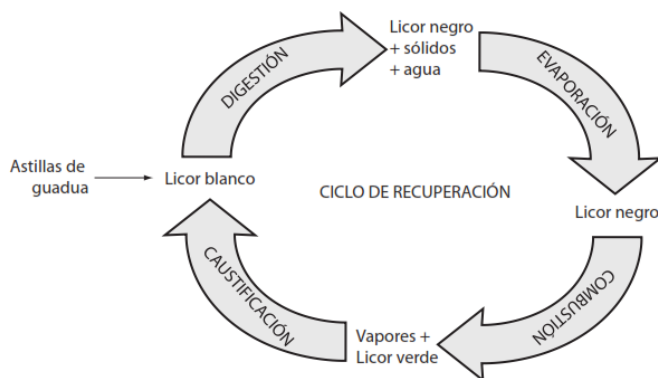


Figura 2.2 Proceso de recuperación de residuos. Fuente Estrada Mejia, 2010

Evaporación: Consiste en evaporar el líquido residual con calor. Durante este procedimiento se produce un número reducido de reacciones químicas, lo cual mantiene estable el proceso. El resultado es un aumento de la concentración de sólidos en el licor de 20 a 80%, aproximadamente. Por último, se debe filtrar el residuo resultante para extraer los sólidos condensados.

Combustión: Este procedimiento se lleva a cabo en una “caldera de recuperación” y consiste en someter los residuos a temperaturas muy elevadas, de tal manera que algunos componentes se evaporen (CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O , SO_2 , CO , NO , entre otros) y otros se fundan (Na_2CO_3 , Na_2S , Na_2SO_4 , NaCl , etc.). Después de pasar por la cámara de recuperación, los residuos líquidos se mezclan con agua y se filtran para retirar impurezas. La sustancia líquida que resulta de este proceso se llama “licor verde”.

Caustificación: El licor verde se mezcla con cal (CaO). Esto genera reacciones químicas que lo transforman en licor blanco, por lo que es posible reutilizarlo en diferentes procedimientos como en la extracción de fibras, empezando el ciclo nuevamente.

El método Kraft y el alcalino son de los más utilizados para la obtención de pulpas. El método alcalino consiste en dar un baño de hidróxido de sodio (NaOH) en diferentes

concentraciones y tiempos, dependiendo del tipo de fibra. El método Kraft tiene una modificación, utiliza NaOH y sulfuro de sodio (Na_2S), este componente estabiliza la celulosa y actúa de catalizador en la reacción para acelerar el proceso. (Valarezo Jaramillo, 2013)

Sin embargo, investigaciones dirigidas a las fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos proponen la utilización de una solución alcalina para deshacer la lignina que contiene el material bruto y separar las fibras (Tabla 2.3). Conforme a esto, los métodos químicos alcalinos son el punto de arranque para lograr la estandarización del proceso de extracción de fibras de bambú. (Estrada Mejia, 2010)

Tabla 2.3 Obtención de fibras naturales. Fuente Estrada Mejia, 2010

Fibras	Producto utilizado	Referencia
Bambú	NaOH	(Mori et al., 2008)
Banano	A mano	(Pothan et al., 2003)
Fique	NaOH	(Rodrigo Velandia, 2008)
Palma de aceite	NaOH	(Sreekala et al., 2001), (Jacob et al., 2004)
Yute	NaOI_4	(Rahman et al., 2008)
	NaOH	(Ray et al., 2001), (Ray et al., 2002), (Gassan, 2002)
	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	(Mannan and Talukder, 1997)
	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} + \text{NaOH}$	(Gassan and Bledzki, 1999)

- Proceso físico

Este involucra la fibrilación superficial con descargas eléctricas. Los procesos físicos más conocidos se realizan mediante plasma frío, que permite implantación química, polimerización, formación de radicales libres, cristalización. Se realiza con el uso de electrones, iones, radicales y moléculas excitadas mediante descargas eléctricas. (George et al., 2001) citado por (Valarezo Jaramillo, 2013)

Como se ha comprobado la gran mayoría de los métodos incluyen una serie de sustancias químicas que afectan tanto al medio ambiente como a las fibras. Sobre esta base, Ernst Maximilian Spengler es conocido por idear, construir y montar plantas para productos de fibras naturales y su procesamiento, sus innovaciones marcan la industria y es considerado un visionario de las fibras naturales y de sus aplicaciones.

Según resalta *Bamboo Technology Network Europe*, la última invención de (Spengler, 2017) es una planta de fibras de bambú para la obtención ecológica de fibras a partir del bambú en crudo. Es la primera vez que las fibras de bambú no se extraen mediante procedimientos químicos, utilizando ácido acético u óxidos cálcicos, sino de modo ecológico y no contaminante mediante desgarradoras. Su principio básico es insertar el bambú en crudo partido en la máquina, la cual extrae fibras de hasta 120 mm de largo del bambú en crudo (Figura 2.3).



Figura 2.3 Obtención ecológica de fibras de bambú. Fuente Spengler, 2017

Las máquinas dispuestas en serie producen fibras de bambú en las calidades gruesa, mediana y fina. Las fibras son estupendas para ser procesadas como:

- Cercos, fieltros, esteras perforadas, fibras pre impregnadas.
- Material de relleno, plásticos reforzados como alternativa a los WPC *Wood Plastics / Compounds*.
- Para componentes híbridos en combinación con plásticos reforzados con fibra de carbono y/o vidrio para piezas estructurales.

Es importante destacar las ventajas de las fibras de bambú obtenidas ecológicamente:

- Las propiedades mecánicas de las fibras de bambú, tales como la dureza y resistencia a la extensión, se conservan mediante el proceso de extracción
- La fabricación de fibras largas necesarias para diversos procedimientos (LFI *Long Fibre Injection Molding*)

- El 80% se convierte en fibras de bambú en crudo, y el restante 20% de material como por ejemplo recortes, polvo de bambú, ligninas se obtienen en el circuito de filtros y se pueden utilizar para otros productos de bambú.

2.2 Matrices cementicias

Las fibras de origen vegetal han sido estudiadas hace ya algunos años. Muchas de las investigaciones sobre su uso como refuerzo de matrices de cemento, han sido originadas debido a la gran disponibilidad y alta resistencia de las mismas. Esa gran disponibilidad combinada con su proceso de producción simple hace que estas fibras sean potencialmente adecuadas para la aplicación en construcciones de bajo coste económico y medioambiental. (Sabanés Hernández, 2013)

Debido a sus propiedades mecánicas, las fibras vegetales mejoran la ductilidad, flexibilidad y la resistencia a la rotura del material resultante, entre otros beneficios. (Balaguru and Shah, 1992) Sin embargo, actualmente la producción industrial de morteros de cemento reforzados con fibras vegetales es muy limitada debido a su falta de durabilidad. Por este motivo, la comunidad científica se ha esforzado durante la última década para mejorar la calidad de estos materiales compuestos. (Coutts, 2005) La principal causa de esta pérdida de resistencia se debe a la presencia de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , ya que en un ambiente alcalino el ion calcio reacciona con la celulosa y rompe las largas cadenas poliméricas. Otro problema que existe son los cambios volumétricos de las fibras en la matriz, además de su predisposición al ataque de microorganismos en ambientes húmedos. (Sabanés Hernández, 2013)

El comportamiento de los sistemas de cemento Portland reforzados con fibras, dependen, en gran medida, de la susceptibilidad de la fibra a los daños físicos durante el proceso de mezclado y su resistencia a las condiciones ambientales del medio donde el producto final prestará servicio (exposición al dióxido de carbono, acción de los cloruros y sulfatos disueltos en el agua, ataque del oxígeno y la luz ultravioleta) (Arboláez Arce, 1997)

Existen varios métodos para prolongar la vida útil de las fibras en compuestos cementicios. Se pueden citar los tratamientos de las fibras con productos que las cubren, es decir, impregnándose en las paredes o rellenando los poros que presentan las mismas (Delvasto

et al., 2004), con el objetivo de protegerlas de la solución alcalina. También la reducción de la alcalinidad de la pasta de cemento por modificación de la matriz con sustitución parcial del cemento por adiciones minerales ha sido investigada como medio de garantizar el desempeño de un compuesto a lo largo del tiempo. (Leal et al., 2004)

El concreto y el cemento reforzado con fibras naturales tienen una relevancia especial en los países en desarrollo debido a su bajo costo, rápida disponibilidad y ahorro de energía. Estos materiales pueden contribuir significativamente al rápido desarrollo de la infraestructura del país. La necesidad de desarrollar materiales de construcción localmente disponibles, mejorar la calidad de los productos y comprender mejor su comportamiento en ambientes reales, no puede ser ignorada. (Da Costa Correia, 2011)

Así también, el Instituto Americano del Concreto (ACI), organismo de reconocido prestigio internacional menciona en una de las publicaciones del comité 544: "El concreto reforzado con fibras naturales es adecuado para la construcción de bajo costo, lo cual es deseable en países en desarrollo. Es importante que los investigadores, los ingenieros de diseño y la industria de la construcción apoyen decididamente el uso y desarrollo de materiales de la localidad. La durabilidad y la sensibilidad a la humedad de las fibras naturales, son los aspectos críticos de estos compuestos y requieren ser investigados. Esta investigación es necesaria para entender completamente por qué la humedad y los ambientes agresivos cambian los mecanismos de falla, y afectan las características de resistencia y tenacidad del compuesto. Potenciales refinamientos en la matriz de cemento, como la reducción de la alcalinidad y de la permeabilidad necesitan ser investigados más profundamente".

2.2.1 Durabilidad de las fibras naturales

Actualmente existen dos opciones para mejorar la durabilidad de los morteros de cemento reforzados con fibras vegetales. En primer lugar, se puede modificar la composición de la matriz para reducir los compuestos alcalinos que provocan que la celulosa pierda su aptitud para reforzar. (Sabanés Hernández, 2013) Este método es efectivo, siempre y cuando se analice la dosificación de las materias primas para lograr un rendimiento similar al de los morteros preparados únicamente con cemento Portland. La segunda opción consiste en modificar la superficie de las fibras con tratamientos químicos para mejorar su estabilidad en

la matriz de cemento, aunque hay que tener en consideración que algunos de estos tratamientos implican el uso de reactivos químicos, aumentando el precio del proceso industrial. (Claramunt et al., 2011)

- Modificación de la composición de la matriz

La alta alcalinidad de la pasta de cemento Portland, a pesar de proteger a las fibras de acero de la corrosión afecta a otros tipos de fibras, deteriorándolas con el paso del tiempo como es el caso de las fibras de vidrio y las fibras naturales celulósicas. Este último ocurre por la degradación que sufre la fibra natural debido al ataque químico que con el tiempo le produce el agua alcalinizada por los elementos alcalinos contenidos en el cemento. (Osorio Saraz et al., 2007)

La descomposición química de la lignina y la hemicelulosa es la principal causa del deterioro por fragilización de la fibra en el concreto. La alcalinidad del agua en el poro de la matriz de cemento disuelve la lignina. Se rompe la unión de las micro celdas individuales las cuales absorben el hidróxido de calcio producto de las reacciones de hidratación del cemento. La fibra pierde su flexibilidad y se fragmenta en pequeñas unidades longitudinales perdiendo su capacidad de reforzar al concreto. (Juárez Alvarado et al., 2004)

Se han obtenido algunas prácticas con el fin de minimizar los procesos de deterioro de las fibras vegetales en la matriz de concreto por efectos de alcalinidad, y buscando que el fraguado del cemento no se vea afectado, utilizando para ello el lavado del material. (Beraldo, 1997) citado por (Osorio Saraz et al., 2007)

De esta forma, (Beraldo, 2004), realizó experimentos con partículas de fibras de bambú para evitar la incompatibilidad en la matriz cemento - bambú, utilizando para ello varios tipos de tratamientos, donde se obtuvo como mejor resultado el lavado realizado con solución de cloruro de calcio al 5% por 24 horas en el cual fueron inmersas las fibras de bambú. (Osorio Saraz et al., 2007)

Para evitar los agrietamientos en las matrices concreto - fibras naturales como es el bambú, tanto en los procesos de armado y curado, se han utilizado varios tipos de tratamientos con diferentes grados de usos, entre los cuales se encuentran algunas cloruros y capas finas de Igol-T o negrolin, los cuales han mejorado la relación entre la interface bambú - concreto por encima del 90%. (Pereira da Rosa, 2002) citado por (Osorio Saraz et al., 2007)

Otra alternativa es presentada gracias al metacaolín, un material manufacturado resultante de la deshidratación del caolín. Su calcinación es producida con el objetivo de alterar la estructura cristalina del caolín, tornándola amorfa y pasiva en la reacción del hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento Portland. (Da Costa Correia, 2011)

En presencia de metacaolín, durante la hidratación del cemento Portland, se forman silicatos de calcio hidratados, que mejoran la resistencia y la durabilidad de las pastas, morteros y concretos en estado endurecido. El resultado es un material cementicio con menor cantidad de clínquer y, consecuentemente, menor consumo de energía y menor emisión de dióxido de carbono (CO_2). La adición de metacaolín produce una matriz más resistente, menos porosa y con menor capacidad de absorción de agua, lo que contribuye a la preservación de las fibras dentro de los compuestos reforzados con fibras. (Toledo Filho et al., 2008) citado por (Da Costa Correia, 2011)

La adición de metacaolín, en sustitución parcial del cemento Portland (sustitución en masa hasta un 15%), se refleja en más productos hidratados debido a la reacción puzolánica, aumenta la resistencia a la compresión, reduce el pH y, por tanto, la concentración del ion hidroxilo (OH^-), además de reducir la permeabilidad de las pastas de cemento. (Da Costa Correia, 2011)

Estudios han indicado que, para el consumo total de hidróxido de calcio, la utilización de un 15% de metacaolín es insuficiente, siendo necesarios niveles más elevados entre un 30 y 40%. (Lima, 2004)

- Modificación de la superficie de las fibras

En ocasiones las fibras contienen sustancias que retardan o inhiben el proceso de fraguado del cemento. En este caso pueden mencionarse los azúcares, que forman una especie de membrana alrededor de los cristales, impidiendo su unión. El azúcar puede ser disuelto por métodos químicos, pero la similitud de su estructura interna con la de la celulosa, llevaría a la desintegración del material.

La extracción de las sustancias solubles, generalmente en forma parcial, se puede llevar a cabo por uno de los dos sistemas:

- Lavado del material, no siempre se justifica económicamente.

- Inmersión, por lo menos durante 24 horas, en una solución de un agente mineralizante (cloruro de calcio, hidróxido de calcio, silicato de sodio, cloruro de magnesio y silicato de potasio).

Las fibras también pueden contener elementos de naturaleza grasosa y con el fin de eliminarlos se realiza el proceso de descerado. Estas sustancias grasas evitan la deshidratación de la vegetación de tipo fibrosa, por lo que son insolubles en medios acuosos. El proceso se realiza con el fin de filtrar, en su totalidad, el solvente que es impregnado dentro del sólido para extraer las sustancias indeseadas. Los solventes más comúnmente utilizados y sus puntos de ebullición se muestran en la Tabla 2.4

Tabla 2.4 Punto de ebullición de solventes. Fuente Valarezo Jaramillo, 2010

Solvente	Punto de ebullición (°C)
Éter	35
Diclorometano	40
Éter de petróleo	35-50
Cloroformo	62
Metanol	65
Etanol – Benceno	65
Hexano	69
Etanol Tolueno	73
Acetato de Etilo	77
Etanol	78
Benceno	80
Ciclohexano	81
Ácido fórmico	101
Dioxano	102
Tolueno	111

Para reducir la alta cantidad de agua que puede absorber la fibra, y adicionalmente darle una protección contra el medio alcalino de la matriz de cemento, se utilizan sustancias principalmente orgánicas repelentes al agua, que no perjudiquen al concreto y que no sean tóxicas durante su manejo, además de ser económicas y de fácil disposición. Lo que se

busca con este tratamiento de la fibra es que los poros de agua alcalinos no puedan llegar a esta y entonces no ocurran las reacciones internas.

Los tratamientos han sido estudiados con resinas epóxicas y de poliésteres, productos bituminosos, barnices, PVA, asfaltos y otros. De esta forma se reduce la interacción entre las fibras y la matriz. El proceso de debilitamiento se hace mucho más extenso, pero no puede ser evitado totalmente. A continuación, se describen algunas de estas sustancias: (Juárez Alvarado, 2002)

- a) Aceite de linaza. Este aceite se extrae en caliente de la semilla del lino, de color ambarino se oxida y polimeriza con facilidad, produciendo una película elástica con propiedades impermeabilizantes. Muy utilizado en la construcción para proteger las cimbras de madera.
- b) Parafina. Esta cera es sólida a temperatura ambiente, con punto de fusión de 67°C aproximadamente. Compuesta por una mezcla de hidrocarburos que se obtienen normalmente como subproducto de la fabricación de aceites lubricantes derivados del petróleo. Se utiliza principalmente para preparar pomadas, velas, así como también, para impermeabilizar papel y telas.
- c) Brea. Resina natural la cual se obtiene de árboles coníferos como el pino. A temperatura ambiente es sólida de color oscuro y frágil. A temperaturas entre los 90 y 100°C se convierte en una sustancia viscosa, puede ser mezclada con solventes como el aguarrás y no es soluble en el agua.
- d) Sellador para madera. Es un barniz comercial a partir de resina nitrocelulosa, es diluido con solventes y se usa para impermeabilizar la madera y preparar la superficie para aplicar el acabado.
- e) Creosola. Sustancia aceitosa que se extrae del alquitrán, contiene fenol y creosol. Se emplea como germicida, insecticida y preservante de la madera especialmente en los durmientes del ferrocarril.

De acuerdo a (Macías Mesa et al., 2009) las fibras también pueden ser impregnadas con agentes bloqueadores, es decir, agentes que pueden reaccionar con ciertos componentes y dar como resultado otros los cuales son difíciles de disolver en un ambiente alcalino. Han sido planteados diferentes agentes bloqueadores, entre estos están:

- a) Silicato de Sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)

- b) Sulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- c) Sulfato de Magnesio (MgSO_4)
- d) Y otros magnesios, hierros, sales de barium, antioxidantes, etc.

De igual forma, la impregnación de las fibras con agentes bloqueadores y repelentes al agua es también una solución. Las fibras primero son impregnadas con agentes bloqueadores, por ejemplo, ácido bórico, nitrato y nitrito de potasio, sulfato de magnesio, cromato de sodio, etc. y luego son impregnados con agentes repelentes al agua tales como esterato de sodio y cromo, ácido esterático y policloruro de vinilo (PVC).

2.2.2 Concreto reforzado con fibras naturales

La tecnología actual de producción de materiales considera que los compuestos más importantes son aquellos que poseen fibras como materias primas para refuerzo. Pues, como una característica inherente de todos los materiales, con especial atención a los más frágiles, una fibra con diámetro pequeño es mucho más rígida y resistente que el propio material en su forma bruta. (Da Costa Correia, 2011)

Es necesario resaltar que (Smith, 1979) trabajó con fibras de bambú y encontró que utilizando la fibra sin ningún tratamiento previo el fraguado de la mezcla era retardado debido a la acción de la glucosa presente en las fibras. Además, la resistencia a flexión del compuesto no presentaba una mejoría significativa en comparación con un concreto sin fibras. Se probaron dos métodos como posibles tratamientos a la fibra, el primero de ellos consistió en sumergir las fibras durante 15 minutos en cemento diluido en agua o lechada, mientras que el segundo método fue hervir las fibras durante el mismo intervalo de tiempo en agua. Posteriormente, se fabricaron cubos con las fibras ya tratadas y se ensayaron a compresión. Los cubos reforzados con fibras tratadas por el segundo método dieron una más alta carga de falla 42,2 kN, sin embargo, esta carga es menor que la carga de falla de un cubo sin fibra la cual fue 60,5 kN. Por otra parte, se fabricaron paneles encontrando que el procedimiento de compactación de los elementos afectaba considerablemente la resistencia de los mismos, así como la adecuada distribución de la fibra en la matriz. Otra observación que se realizó fue que la fibra pierde humedad dentro de la matriz de cemento y esto origina una contracción que afecta seriamente la adherencia fibra - matriz.

Para fabricar concreto reforzado con fibras, generalmente se utiliza el método de mezclado húmedo. En el mismo se utiliza un bajo contenido de fibras. Primero se colocan los agregados, se agrega el cemento con el agua y posteriormente los aditivos, todo es mezclado en una revolvedora mecánica. Finalmente se agrega la fibra tratando de dispersarla en la mezcla. (Juárez Alvarado, 2002)

El colado se puede realizar con equipo convencional usando vibradores internos o externos para su mejor compactación. El procedimiento de mezclado, colado y compactado es muy similar al sugerido para concretos reforzados con fibras de acero, vidrio o plásticas. (Juárez Alvarado, 2002)

En la tabla 2.5 se presentan los diferentes factores que pueden hacer variar las propiedades del concreto. Este listado no es exhaustivo, pero enfatiza la complejidad para producir un concreto de buena calidad. El tipo y la longitud de la fibra, así como también el volumen de la fibra en la mezcla, son los factores que más influyen en la resistencia del concreto (Juárez Alvarado, 2002)

Tabla 2.5 Factores que afectan las propiedades de los concretos reforzados con fibras. Fuente Juárez Alvarado, 2002

Factor	Variables
Tipo de fibra	Coco, sisal, caña de azúcar, bambú, yute, madera, plátano
Geometría de la fibra	Longitud, diámetro, sección transversal, anillos y puntas
Conformación de la fibra	Monofilamento, multifilamentos, rizados y nudos simples
Condiciones superficiales	Hongos, presencia de recubrimientos
Propiedades de la matriz	Tipo de cemento, tipo de agregado y granulometría, tipo de aditivos
Diseño de la mezcla	Contenido de agua, relación agua/cemento, laborabilidad, contenido de fibra
Método de mezclado	Tipo de mezcladora, secuencia al agregar los ingredientes, método para agregar las fibras, duración y velocidad del mezclado
Método de compactación	Vibración convencional, por presión y por impacto
Técnica de colado	Colado convencional, lanzado, o por extrusión
Método de curado	Convencional, métodos especiales

Según (Juárez Alvarado, 2002) las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras varían cuando está en estado fresco y cuando ha endurecido.

Concreto fresco. La adición de fibras naturales a la mezcla tiende a reducir la laborabilidad, debido principalmente a la absorción de agua, al incremento del área superficial y especialmente a la forma y tamaño de las fibras en relación con las otras partículas que constituyen la mezcla. Esto es importante, ya que una mezcla muy seca tendrá problemas de compactación originando huecos en el producto final y una distribución no uniforme de las fibras. Por otra parte, una mezcla con alto contenido de agua disminuirá considerablemente la resistencia mecánica del compuesto endurecido. Otro aspecto importante es la tendencia que tienen las fibras de aglomerarse entre sí, esto ocurre principalmente cuando se tiene una alta relación de aspecto (longitud/diámetro) de la fibra. Al aglomerarse las fibras producen una segregación en la mezcla y se incrementa la porosidad del concreto. También, se ve afectada la resistencia y se producen variaciones entre especímenes de una misma mezcla. Algunos métodos de mezclado se pueden usar para minimizar este problema, normalmente agregando las fibras en forma progresiva después que han sido mezclados los otros ingredientes. Sin embargo, las fibras permiten que la mezcla en estado fresco tenga la suficiente plasticidad para ciertas aplicaciones, como, por ejemplo, en placas delgadas de pasta de cemento o mortero y cascarones como estructuras arquitectónicas.

Concreto endurecido. El concreto simple posee una excelente resistencia a la compresión, sin embargo, es frágil. Las fibras proporcionan ductilidad al concreto y permite mejorar propiedades tales como la tensión, la flexión, el impacto y la tenacidad, mientras que la resistencia a la compresión en algunas ocasiones es afectada adversamente con respecto al concreto simple. El micro agrietamiento se reduce distribuyendo los esfuerzos internos. El comportamiento plástico posterior al agrietamiento es considerablemente afectado por la adherencia, el volumen y la longitud de las fibras, además de las propiedades mecánicas de éstas. La adherencia puede verse afectada debido a la expansión de la fibra dentro de la mezcla húmeda, y la posterior contracción por secado. Otras propiedades que se han evaluado son la absorción de energía, aspectos térmicos tales como conductividad, difusividad, calor específico y coeficiente de expansión térmica. Adicionalmente, se han investigado propiedades acústicas como la absorción y la transmisión del sonido, así

también, la permeabilidad, la absorción de agua y las características de expansión – contracción.

2.2.2.1 Consideraciones generales en el uso de fibras naturales en el concreto

Para elaborar un concreto reforzado con fibras naturales se debe tener en cuenta que los agregados conforman más del 70% del volumen total del producto, por lo cual no pueden ser tomados a la ligera, especialmente la incorporación de fibras, debido a que tienen que cumplir con una serie de características y/o especificaciones de acuerdo al tipo de concreto que se desea elaborar. Por lo tanto, deben ser sustancias limpias, durables, duras, resistentes, libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. (Reyes, 2008)

A continuación, se proponen una serie de consideraciones a tener en cuenta durante la fabricación de concretos reforzados con fibras. (Salazar Castillo, 2015)

- El principal propósito del concreto reforzado con fibras es mejorar su resistencia a tracción y evitar el agrietamiento. Mientras los refuerzos de asbestos y acero cumplen esta función durante varios años, las fibras naturales mantienen sus resistencias sólo durante un período relativamente corto (a menudo mucho menos de un año), debido a su tendencia a degradarse en la matriz alcalina, especialmente en ambientes, cálidos y húmedos.
- Para muchas aplicaciones, por ejemplo, para techos la pérdida de resistencia no necesariamente es una desventaja. Las fibras mantienen unida la mezcla húmeda, evitando el agrietamiento durante el moldeado y secado, y da al producto suficiente resistencia para soportar el transporte, la manipulación e instalación.
- Cuando las fibras pierden su resistencia, el producto es equivalente a un concreto no reforzado. Sin embargo, en ese momento el concreto habrá alcanzado su resistencia total, y como el agrietamiento se ha evitado en las etapas iniciales, podría ser más resistente que un producto similar hecho sin refuerzo.
- El contenido de fibra generalmente es de aproximadamente 1 a 2% del peso, nunca del volumen, ya que las densidades de las fibras pueden variar grandemente.

- Con fibras largas adecuadamente alineadas se obtiene mayor resistencia al impacto y resistencia a la flexión. Sin embargo, el método de trabajar varias capas de fibra en el concreto, de modo tal que cada fibra esté completamente encajada en la matriz, es relativamente difícil, y por ello raramente realizado.
- En el método de fibras cortas, las fibras cortadas son mezcladas con el mortero, el cual es fácil de manipular como una masa homogénea. Debido a que las fibras se distribuyen aleatoriamente, imparten resistencia al agrietamiento en todas las direcciones. La longitud y cantidad de las fibras es importante, ya que fibras demasiadas largas y en exceso tienden a formar trozos y bolas, y la insuficiencia de fibra producen agrietamientos excesivos.
- Para sellar el sistema de poros de la matriz de concreto se han probado varios métodos (el uso de una mayor proporción de elementos finos, menor relación agua cemento, etc.), y se han obtenido interesantes resultados añadiendo pequeñas bolitas de cera al mortero fresco. Cuando el concreto fraguado se calienta (sol), la cera se derrite y llena el sistema de poros, reduciendo así la absorción del agua que causa la degradación de la fibra.

2.2.3 Cenizas de hojas de bambú como material puzolánico

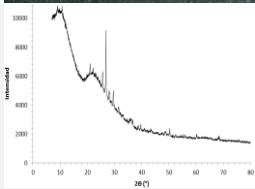
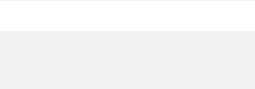
En la actualidad se ha venido probando el uso de materiales denominados residuos industriales, para el mejoramiento de las propiedades del concreto. En el caso de los materiales del sector agrícola se tiene la cascarilla del arroz, bagazo de la caña de azúcar, médula de coco, gránulos de corcho, y cenizas volantes obtenidas de la incineración de residuos sólidos, entre muchos otros residuos que han sido usados para la elaboración de morteros y concretos. (Hui-sheng Shi, 2009)

La selección de la hoja del bambú como puzolana artificial ha tenido como base estudios realizados por Dwivedi (2006) sobre su evaluación y potencialidades como puzolana en la industria del cemento en la India; (Singh et al., 2007) se refirieron a la hidratación de la ceniza de la hoja de bambú mezclada con cemento Portland también en la industria de la India; más recientemente las investigaciones como la de (Villar, 2010), en la cual se logró la caracterización y determinación de parámetros cinéticos de la ceniza de la hoja de bambú y

la caracterización de estas cenizas y su influencia como material puzolánico llevada a cabo por (Cardona Castro, 2013)

El estudio más reciente, (Cardona Castro, 2013), siguió la metodología de trabajo siguiente para evaluar las cenizas de hojas de bambú. La Tabla 2.6 muestra en resumen el proceso de investigación trazado.

Tabla 2.6 Metodología para evaluar las cenizas de hojas de bambú

Actividad	Descripción	Imágenes
1. Secado de las hojas al sol	6 horas	
2. Corte de las hojas por medio de un equipo de aspas		
3. Pre - quema de las hojas	Incinerador por 5 minutos hasta 300°C	
4. Preparación de la muestra para el ingreso al horno	Capas con un espesor no superior a 1 cm	
5. Quema en el horno eléctrico controlando el incremento de temperatura	15 minutos a 150°C, 10 minutos a 350°C, 10 minutos a 550°C, 2 horas a 650°C	
6. Molienda	30 minutos	
7. Análisis de composición química por FRX y DRX		
8. Tamizado del material	Malla 200, 325, 400	
9. Análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP)		

10. Análisis del tamaño y forma de las partículas por SEM



11. Medición de reactividad puzolánica
[Ca (OH)₂ + BLA]



12. Evaluación de resistencia a la compresión en cubos de mortero

Reemplazo del 20% del peso del cemento por cenizas



13. Análisis de resultados



Del análisis de los resultados se concluyó

- El proceso de secado, pre - quema y quema controlada es indispensable para la correcta obtención de la ceniza; del buen manejo de esto depende en gran medida el lograr el porcentaje indicado de los minerales deseados.
- La quema de la ceniza en el horno eléctrico debe hacerse por pequeñas capas que garanticen una quema uniforme, reduciendo la probabilidad de obtener un alto contenido de inquemados.
- La actividad puzolánica de la ceniza caracterizada por medio del método de la conductividad eléctrica muestra una alta actividad en edades tempranas, siendo mayor durante las primeras 10 horas y continuando la reacción incluso hasta después de las primeras 70 horas.
- La ceniza de la hoja de bambú es un buen material puzolánico que reacciona con el hidróxido de calcio formando silicato de calcio hidratado, el cual es el responsable de la resistencia de los morteros y concretos.
- Tal como se observa en la Figura 2.4, la apariencia de los morteros es bien diferente, el cubo del lado izquierdo de la figura presenta un color más claro que el de la

derecha, y se puede ver que la porosidad es mucho menor en este que en el cubo del lado derecho de la figura.



Figura 2.4 Aspecto de un cubo de mortero elaborado con ceniza de hoja de bambú (Izquierda) versus un cubo de mortero elaborado con cemento Portland estructural (Derecha). Fuente Cardona Castro, 2013

A pesar de existir una diferencia visual en el grado de porosidad de las muestras, no se presenta un mejor comportamiento mecánico. Sin embargo, es bien importante destacar que la preparación de la mezcla con remplazo de cemento por ceniza se logró con una relación A/C de 0,57; comparado con una relación A/C de la mezcla de control de 0,484. Lo anterior permite identificar que a pesar que la mezcla con remplazo fue preparada con una relación agua - material cementante mayor que la mezcla de control, se lograron resultados a la compresión para los cubos a los 7 y 28 días muy similares en ambos casos.

2.2.4 Aplicaciones

El uso de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos ha crecido notablemente en las últimas décadas como un modo de sustituir las fibras sintéticas en sectores como el industrial, automovilístico y por supuesto también en el sector constructivo. Los productos de la combinación de fibras naturales y diferentes matrices, especialmente cementicias, son caracterizados por su biodegradabilidad, menor densidad, baja abrasividad, propiedades mecánicas útiles y su bajo costo. Sus condiciones de ejecución y uso han sido probadas con anterioridad y poseen una vasta gama de aplicación en función de constituir nuevos materiales ecológicos y sostenibles.

La adición de cenizas de hojas de bambú al cemento trae como resultado el concreto de alta resistencia para satisfacer necesidades como el incremento del módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, incremento en la resistencia a la compresión, resistencia al ataque químico, etc. Entre sus tantas aplicaciones se tiene la construcción de presas, hidroeléctricas, túneles, cubierta de graderías, cimentaciones marinas, pisos industriales, entre otras. (Cardona Castro, 2013)

Otra de las exigencias modernas para el concreto de alta resistencia es el desarrollo de los prefabricados de concreto. Este importante sector brinda nuevas metodologías constructivas eficientes y competitivas frente a los sistemas tradicionales. Hoy en día en el mercado se comercializan bloques de concreto, ladrillos y adoquines; sin embargo, algunas empresas han apuntado aun más lejos ofreciendo prefabricados de piezas estructurales como vigas, columnas, losas de entrepiso o muros de cerramiento, entre otros, como una alternativa en el sector para incrementar la velocidad de construcción. (Cardona Castro, 2013)

Por otro lado, están los concretos reforzados con fibras cuyas potenciales aplicaciones dependen de la capacidad de proveer un material con calidad, resistente y durable. Así como también, de la imaginación de los ingenieros y constructores para sacar provecho de las propiedades estáticas y dinámicas. Dentro de las más comunes soluciones se destacan:

- Tejas y láminas corrugadas para techos.
- Baldosas planas para pisos y pavimentos.
- Paneles ligeros para pared y elementos para enchapados.
- Enlucidos para mampostería de concreto o muros de concreto.
- Jambas de ventanas y puertas, antepechos de ventana, parasoles, tuberías.

De una manera más específica se describen algunos de estos usos.

Bóvedas como aligerante para losas. Estas pueden sustituir a las bovedillas convencionales en el sistema de vigueta y bovedilla. Es un sistema muy común en la construcción de losas para entrepisos y azoteas, en edificios comerciales y habitacionales. Se sugiere su uso como aligerante y cimbra perdida para losas, por su capacidad de carga y la facilidad en la técnica de producción.

Láminas acanaladas. Este material puede sustituir a las láminas de acero o de asbesto - cemento. (Lewis and Mirihagalia, 1979), (Parry, 1979) Las placas acanaladas de concreto

con fibras pueden usarse para la construcción de techos de bajo costo, las placas pueden ser fácilmente fabricadas y producidas a escala comercial impulsando la construcción en los países en desarrollo. A diferencia de las bóvedas en donde la durabilidad no es crítica debido a que es un elemento no estructural y que sólo resiste cargas durante la construcción de la losa; las placas acanaladas deben satisfacer condiciones de durabilidad para que sean una alternativa real para sustituir al asbesto - cemento. (Juárez Alvarado, 2002)

Placas como cimbra perdida para puentes y edificios. (Schafer and Brunssen, 1990) Su aplicación es similar a la descrita para las bóvedas en donde la placa queda embebida en la losa de los puentes o del edificio. Su principal función es la de resistir las cargas propias de la construcción antes del colado y de soportar al concreto en estado fresco. Una vez endurecido el concreto de la losa principal, la placa con fibras es relevada de los esfuerzos. Esto representa un ahorro económico ya que actualmente se utilizan placas pretensadas como cimbra perdida en puentes y para los edificios las placas se refuerzan con malla de acero. En ambos casos el costo del refuerzo es considerablemente mayor que el ocasionado por las fibras. (Juárez Alvarado, 2002)

A excepción de las placas acanaladas, las aplicaciones propuestas tanto para las bóvedas como para las placas planas son de un elemento estructural secundario. Los principales esfuerzos que deben soportar estos elementos son la contracción por secado, los cambios de volumen por la temperatura y los producidos por las cargas propias durante la etapa de construcción las cuales pueden ser de impacto. De acuerdo con (Shah, 1990) y (Naaman, 1985) el concreto con fibras tiene una alta resistencia a las cargas de impacto debido a su capacidad de absorber energía o tenacidad. La exposición al ambiente natural que tienen estos elementos es mínima, y el problema de durabilidad no es tan crítico ya que se encuentran protegidos por la estructura principal. Sin embargo, la aplicación del concreto con fibras naturales puede ser más amplia, por ejemplo, en la construcción y reparación masiva con concreto, en el concreto lanzado y prefabricados. (Juárez Alvarado, 2002)

Estos concretos son usados también para la confección de elementos prefabricados en fachadas ventiladas, cielos rasos, como revestimiento de exteriores. (Sabanés Hernández, 2013)

La empresa Euronit, especializada en la fabricación de materiales de construcción, cuenta con una gama de paneles de cemento reforzados con fibras orgánicas que sirven como

ejemplo de las aplicaciones en interiores de estos materiales (Figura 2.5) (Sabanés Hernández, 2013)

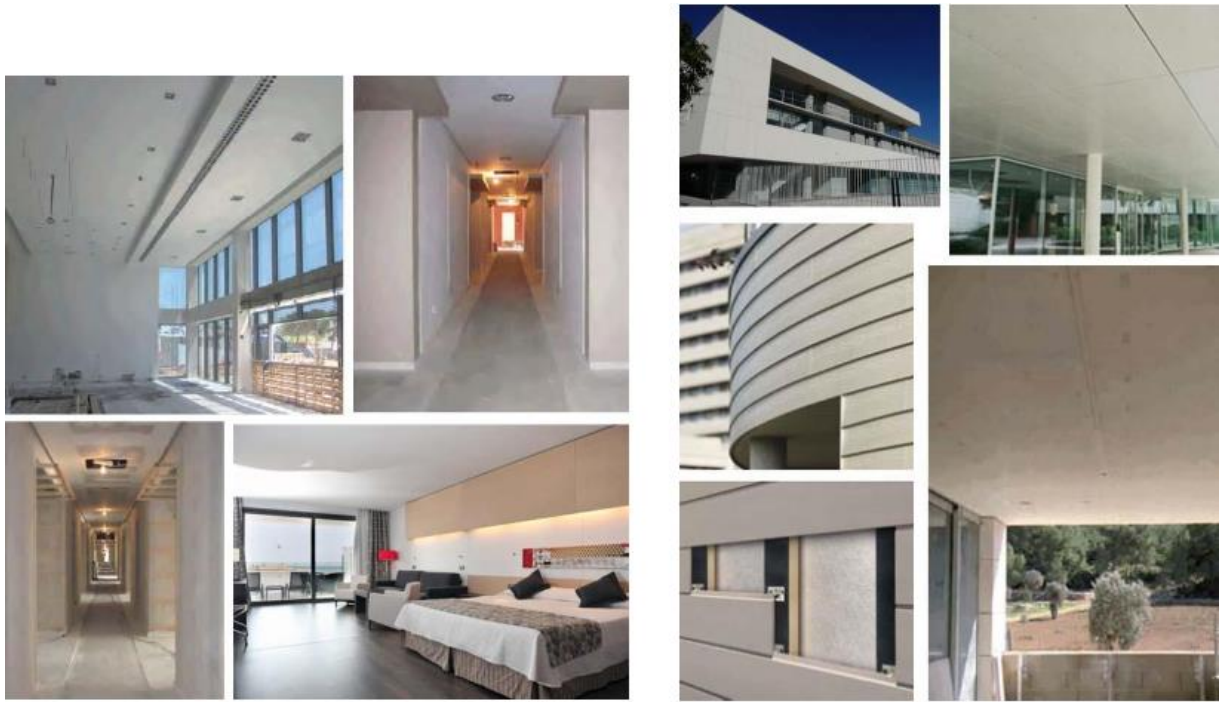


Figura 2.5 Paneles de cemento reforzados con fibras naturales. Fuente Sabanés Hernández, 2013

La proposición de un material con fibras naturales para construcciones resistentes al fuego usado en Japón fue realizada por (Suzuki and Yamamoto, 1990). De acuerdo con sus investigaciones, las fibras naturales llegan a ser incombustibles cuando son recubiertas por ceniza volante y cemento. Así también, cuando se recubren con una pasta de cemento el cual fue mezclado con cerámicos solubles en agua. (Juárez Alvarado, 2002)

Además de los materiales descritos, pueden ser fabricados otros tipos de materiales de construcción, como tubos (Lipangile, 1990), tanques de almacenamiento, bardas, pisos industriales. (Huybers, 1990) Su aplicación dependerá de la necesidad de usar materiales más económicos y solucionar los problemas de construcción que se presentan continuamente.

2.3 Matrices poliméricas

Los principales roles de la matriz, especialmente en los materiales compuestos de alto desempeño, son proveer un soporte para las fibras de refuerzo y transmitir localmente el esfuerzo que viaja de una fibra a otra. Adicionalmente, la matriz le da al material su forma, apariencia, superficie y resistencia al ambiente, y protege las fibras ante agentes externos para que ellas se encarguen de soportar la mayoría de cargas estructurales.

El estudio de materiales compuestos avanzados que proporcionan propiedades mecánicas superiores a los materiales convencionales abre un nuevo horizonte en la ingeniería de materiales, ya que es posible desarrollar en ellos ventajas como la resistencia a la corrosión, aislamiento eléctrico, reducción de costos de fabricación y manufactura, reducción de la expansión térmica y resistencia a la fatiga, entre otras. (Sreekumar, 2008) Algunas de las anteriores características dependen directamente de la matriz que se escoge, por lo que resulta necesario entender el comportamiento y propiedades de los materiales que se encuentran a disposición para este fin. (Estrada Mejia, 2010)

Las principales características de las matrices poliméricas es poseer baja densidad, excelentes propiedades a temperatura ambiente, facilidad de conformado y costos relativamente bajos, debido a esto son empleadas en una gran cantidad de aplicaciones. (Espinoza Beltrán and Hidalgo Pacheco, 2016)

Según (Guerrero y otros, 2011), las matrices poliméricas pueden ser de tres tipos, en función de su comportamiento en presencia de calor: termoplásticas, termoestables y elastoméricas. (Espinoza Beltrán and Hidalgo Pacheco, 2016)

a) Matrices termoplásticas

Este tipo de plásticos tienen la característica particular de que una vez polimerizados pueden ablandarse o derretirse con calor para cambiar su forma. Este procedimiento no afecta exageradamente sus propiedades, lo cual los hace muy prácticos para ser reutilizados. Por otra parte, son más compatibles que los termoestables con métodos de fabricación como el moldeado por inyección y el formado en caliente, además de que pueden ser procesados

más rápido. Lamentablemente su procesamiento no es fácil de controlar cuando son polímeros cristalinos o semi cristalinos, pues tienen una corta vida por fatiga y dependen altamente de los cambios de temperatura. Entre los polímeros termoplásticos más utilizados en la industria de los materiales compuestos se encuentran el polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE), poliéster (PET) y policloruro de vinilo (PVC). (Brent Strong, 2006)

b) Matrices termoestables

Estas no se funden al calentarse, sino que empiezan a degradarse. Tienen múltiples enlaces entrecruzados en una estructura de red tridimensional, por lo que no son fáciles de reprocesar después que las reacciones de entrecruzamiento han tenido lugar, lo que hace difícil su reciclaje. Son polimerizadas por una reacción química que generalmente no es reversible. Entre estos se encuentran: poliuretano (PUR), melanina, duraplast y resinas del tipo poliéster, epoxi y fenólicas, poliéster no saturado, vinilester y el fenol formaldehído

c) Matrices elastoméricas

Poseen una zona elástica grande y pueden estirarse hasta cinco o seis veces su longitud original. Sin embargo, sus módulos de elasticidad son bajos, teniendo menos enlaces de reticulación entre cadenas que los termoestables. El caucho natural pertenece a este tipo de matrices.

En el refuerzo de polímeros se han empleado como matrices tanto termoplásticos como termoestables (Brief, 2011), aunque las más ampliamente utilizadas han sido las primeras destacándose varios aspectos como temperatura de procesamiento efectiva, menor tiempo de procesamiento, temperatura adecuada para conservar propiedades del reforzante, buenas propiedades mecánicas, no tóxicas y fácil procesamiento. Una comparación entre las matrices termoplásticas y termoestables se presenta en la Tabla 2.7 (Valarezo Jaramillo, 2013)

Tabla 2.7 Comparación termoplásticos vs termoestables. Fuente Valarezo Jaramillo, 2013

Variables	Termoplásticos	Termoestables
Temperatura de procesamiento	+	+
Tiempo de procesamiento	+	-
Temperatura de uso	-	+
Resistencia a los disolventes	-	+
Dureza	+	-
Toxicidad	+	-
Dificultad de procesamiento	+	-
Costo de procesamiento	+	-

Nota: Aspecto positivo (+), Aspecto negativo (-)

La utilización de poliolefinas viene propiciada por las excelentes propiedades plásticas obtenidas en los compuestos y la mayor rigidez proporcionada por las fibras junto a un incremento en mayor o menor grado de las propiedades del producto con la incorporación de fibras naturales cortas. (Nabi Saheb and Jog, 1999), (Herrera-Franco and Valadez González, 2004), (Idicula et al., 2006), (Li et al., 2008) A continuación se muestran las características de las principales matrices termoplásticas usadas en la fabricación de materiales compuestos.

- Polietileno (PE) como matriz

El polietileno es uno de los polímeros de mayor producción en el mundo en la actualidad ha sido ocupado en variedad de propósitos tanto donde el requerimiento sea de un material suave y flexible hasta un material duro y resistente. La materia prima para formar PE es el petróleo, tratado por medio de *cracking* a elevadas temperaturas se obtiene el etileno. La combinación de miles de moléculas de etileno forma el polietileno. (Valarezo Jaramillo, 2013)

Los polietilenos se clasifican por su densidad. Entre los principales están: polietileno de alta densidad (PEAD) que se caracteriza por su resistencia a la tracción y por su alto peso; polietileno de baja densidad (PEBD), este posee una menor compactación y disminución en su resistencia a la tracción, haciéndolo más dúctil; y el polietileno de baja densidad lineal (PEBDL) con propiedades similares al polietileno de alta densidad pero con un peso más ligero, más resistente a la tracción, al impacto y a la perforación en comparación con el PEBD. (Valarezo Jaramillo, 2013)

- Polipropileno (PP) como matriz

El polipropileno es un polímero que puede ser fabricado como plástico y como fibra ya que es un material liviano. Por la baja densidad es empleado como plástico y es ideal para elementos que requieran temperaturas de estabilización altas debido a que se mantiene estable hasta los 100°C sin deteriorarse. Es muy ocupado como fibras para piscinas y canchas de tenis por su bajo porcentaje de absorción de agua, por lo que es un buen candidato a utilizar como matriz de compuestos. (Valarezo Jaramillo, 2013)

- Resina poliéster insaturado como matriz

Existe una gran variedad de resinas con propiedades adaptadas a cada necesidad, entre ellas se encuentran: resina viniléster, resina isoftálica (presenta buena resistencia a los químicos, bajo porcentaje de absorción de agua y alta temperatura de distorsión), resina ortoftálica (es rígida con un tiempo del gel más prolongado, menor resistencia química y a al impacto, así como también una mayor absorción de agua). (Valarezo Jaramillo, 2013)

2.3.1 Consideraciones generales de materiales poliméricos fibro-reforzados

Ventajas como peso relativamente bajo, alta durabilidad y flexibilidad, elevada resistencia mecánica y a las altas temperaturas son las causas principales del mayor uso de compuestos con matrices poliméricas sobre los demás materiales compuestos con cerámicas y metales. Además, los compuestos de matrices de polímeros pueden procesarse a bajas temperaturas y presión. (Kumar Gupta, 2014)

El comportamiento mecánico de los polímeros compuestos reforzados con fibras naturales (NFPC) es principalmente influenciado por un gran número de parámetros como el volumen de fibras, la longitud de fibras, la relación fibra - matriz, la adherencia, la orientación de las fibras y la transmisión de tensiones. Para mejorar el comportamiento mecánico global de los compuestos, las propiedades de matriz y fibras tienen que ser primeramente mejoradas. Varias investigaciones han sido realizadas con diferentes fibras naturales como el cáñamo, lino, yute y bambú cuyo objetivo fue estudiar el efecto de estas fibras en la fuerza mecánica y física de materiales compuestos. (Mansur and Aziz, 1983), (Satyanarayana et al., 1986), (Satyanarayana et al., 1990), (Lundquist et al., 2003) El bambú encuentra su aplicación en

los materiales compuestos en varios formularios, estos van desde la fibra corta a las tiras largas, incluso el bambú entero. Investigadores han extendido su interés en el desarrollo de productos usando las fibras de bambú por su fortaleza, así como por la posibilidad de generar alta calidad en un sinnúmero de productos industriales sustentables. (Khalil et al., 2012)

Sobre esta base, las poliolefinas como el polipropileno (PP) y polietileno de baja densidad (LDPE), materiales poliméricos de mayor consumo debido a sus interesantes propiedades y bajo costo; poseen la ventaja de un fácil y económico procesado, la posibilidad de reciclado y la incorporación de fibras cortas de refuerzo permite aumentar la rigidez y resistencia de estos materiales manteniendo la posibilidad de su transformación mediante las técnicas convencionales empleadas para procesar termoplásticos. (Salvador et al., 2007)

La condición de refuerzo se debe a la resistencia de las fibras, caracterizada por su dureza y la relación de forma de las mismas, la compatibilidad con la matriz que supone una transmisión de esfuerzos adecuada (Mohanty et al., 2000), (Luyt and Malunka, 2005), (Torres and Cubillas, 2005), (Choudhury, 2008) y la cantidad de fibra en el compuesto final, que viene condicionada por la orientación y ordenamiento de las fibras en la matriz. (Singleton et al., 2003) citado por (Amigó et al., 2007)

El método de fabricación también es una característica que determina el uso de la pieza y la naturaleza de las constituyentes del compuesto. Los polímeros termoestables y termoplásticos son diferentes, por lo que se utilizan métodos distintos para la fabricación de elementos con estos materiales. Por otro lado, las características físicas de las fibras también restringen la posibilidad de fabricación de algunas piezas, puesto que propiedades como la temperatura de degradación del refuerzo, se deben tener en cuenta en el procesado de la pieza. Estas particularidades hacen que el carácter largo pero discontinuo de las fibras de guadua no permita fabricar elementos con refuerzo orientado y continuo. Por esto, las piezas que se pueden fabricar con refuerzo de guadua son aquellas cuyo proceso de fabricación sea el moldeo a presión, moldeo por inyección y extrusión (Figura 2.6). Aun con dichas limitaciones, la variedad de matrices disponibles hace que los compuestos poliméricos reforzados con fibras de guadua tengan muchas aplicaciones. (Estrada Mejia, 2010)

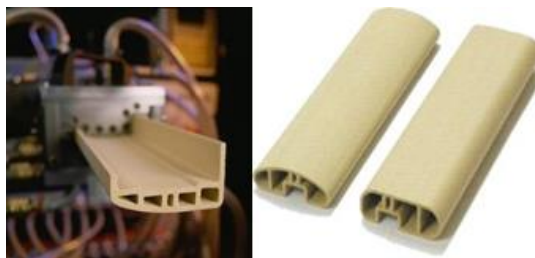


Figura 2.6 Perfiles hechos por extrusión. Fuente Majewski and Błędzki, 2013

De acuerdo con (Chandramohan and Marimuthu, 2011), (Kumar et al., 2011), (Sen and Reddy, 2011), la aplicación de fibras vegetales como el refuerzo permite la obtención de productos compuestos que, además de presentar una menor masa específica aparente y mayor porosidad, también presentan valores satisfactorios de resistencia a la tracción y al impacto, mayor control de la fisuración y un comportamiento dúctil a la ruptura. (Guimarães Junior et al., 2012)

Sin embargo, cuando no existe una buena adhesión en la interface, la incorporación de fibras cortas a un polímero produce la aparición de defectos en la interface. Estos se ponen de manifiesto en una disminución de la resistencia debido a la concentración de tensiones creadas por solapamiento de fibras y los extremos de las mismas. Si la adhesión es buena, aumenta la resistencia y la unión fibra - polímero dificulta la formación de huecos y por lo tanto su deformación. En todo caso, la deformación del material a rotura será controlada por la resistencia del propio material y por la adhesión fibra - matriz. (Martínez et al., 2000) Así, estructuras fuertemente compactadas, es decir, con huecos interfaciales mínimos darán lugar a estructuras de alta resistencia. La fracción de empaquetamiento óptima se produce cuando la conjunción entre dimensiones de la fibra (relación de forma longitud/diámetro) y las características de la matriz polimérica son las adecuadas. (Salvador et al., 2007)

El desarrollo de materiales ecológicos y procesos de producción menos contaminantes e impactantes ha sido una necesidad por la mejora de vida de las generaciones futuras. En ese contexto de la preservación, el uso de materiales compuestos formados por matrices poliméricas y fibras naturales es una alternativa de gran interés.

2.3.2 Materiales compuestos biodegradables reforzados con fibras

Los plásticos pueden ser también naturales, se denominan bioplásticos. (Fomin, 2001), (Bledzki and Faruk, 2004), (Faruk et al., 2012) Estos pueden ofrecer una reducción en la dependencia de combustibles fósiles y sus impactos sobre el ambiente. El bioplástico es un material polímero fabricado a partir de materias primas naturales (azúcar, almidón, celulosa, patatas, cereales, melaza, aceite de soya, maíz, etc.); estas son procesadas por organismos vivos (hongos, bacterias o algas), por lo que casi no producen contaminación en su producción, y es biodegradable. Las producciones de este tipo de polímero, con vista al futuro, serán a partir de plástico de almidón, ácido poliláctico (PLA) producido vía ácido de azúcar fermentada, y polyhydroxyalkanoate (PHA, PHAs) extraído de aceites vegetales. (Majewski and Błędzki, 2013)

El uso de materiales biodegradables reforzados con fibras vegetales ha permitido bajar los costos y mejorar ciertas propiedades. Es importante indicar que al combinar una matriz biodegradable con fibras vegetales se obtiene un material completamente biodegradable, lo que permite proponer a estos materiales como una alternativa ecológica ya que tendrán una mejor aceptación en la población debido a la tendencia actual de cuidar y preservar el medio ambiente. (Guerrero et al., 2011)

Estos aspectos generan nuevas oportunidades y posibilidades de desarrollo de materiales para una variedad de productos y aplicaciones. Matrices como PLA (polímero biodegradable sintético) y PHA (polímero degradable natural) son de las más utilizadas y sus propiedades mecánicas, al igual que el resto de materiales compuestos, dependen en gran medida de la cantidad de fibra, longitud, morfología y orientación. (Espinoza Beltrán and Hidalgo Pacheco, 2016) La figura 2.7 muestra el grado de degradación de un envase de plástico biodegradable durante un período de 10 semanas.



Figura 2.7 Degradación de un envase de P(3HB-CO-3HV) en lodo activado durante un periodo de 0, 2, 4, 6, 8 y 10 semanas. Fuente (Jung, 2007)

Los polihidroxicanoatos (PHAs) representan un grupo importante dentro del ámbito de los polímeros biodegradables. Biopolímeros como el poli (3-hidroxibutirato) (PHB) son muy usados en la elaboración de materiales compuestos completamente biodegradables. Además de las ventajas relacionadas con la biodegradabilidad y biocompatibilidad, las matrices de PHB ofrecen otras como: (Espinoza Beltrán and Hidalgo Pacheco, 2016)

- El PHB es hidrofóbico, por lo tanto, protege la fibra natural del ataque de la humedad.
- El PHB es un poliéster lineal saturado que puede ser procesado como un termoplástico regular a temperaturas relativamente bajas. Por ello se puede evitar la degradación térmica de la fibra natural.

Sin embargo, las fibras naturales de carácter hidrófilo presentan algunas desventajas, por ejemplo, la baja compatibilidad con las matrices poliméricas que, a la vez, poseen en su mayoría un comportamiento hidrófobo. Esa diferencia de afinidad resulta en una baja adherencia superficial, que impide la transferencia de tensiones efectivas, reduciendo, por consiguiente, las propiedades mecánicas del compuesto. En este sentido, (Fowler et al., 2006) y (Dhakal et al., 2007) afirmaron que la incompatibilidad entre fibra y matriz puede ser clasificada de dos maneras: la incompatibilidad química que puede debilitar la fibra y la incompatibilidad físicas que pueden causar pérdida de adherencia. (Guimarães Junior et al., 2012)

2.3.3 Mejoramiento interfaz matriz - fibra

Existen tres métodos para mejorar la adhesión matriz polimérica con el refuerzo de fibras naturales: la primera es tratar la matriz mediante la creación de componentes OH para lograr la unión con las fibras; el segundo consiste en modificar las fibras a través de la eliminación de componentes como la lignina y las grasas vegetales y el tercero se basa en la incorporación de agentes de acoplamiento.

- Modificación de la matriz polimérica

En lo que respecta a tratamientos y modificaciones que se les realizan a las matrices poliméricas para mejorar su adherencia al compuesto se destaca el tratamiento mediante anhídrido maleico más conocido como MAPE para polietileno y MAPP para polipropileno. Algunas variables en el tratamiento son analizadas en la Tabla 2.8

Tabla 2.8 Evaluación del tratamiento anhídrido maleico. Fuente Valarezo Jaramillo, 2013

Variables	Tratamiento anhídrido maleico
Utilización a nivel productivo	Medio
Costos de procedimiento	Económico
Dificultad de utilización	Fácil
Acceso a los materiales y reactivos	Difícil

- Modificación de las fibras

Para mejorar la adherencia en la interfaz fibra - matriz, las fibras naturales necesitan ser modificadas superficialmente para que puedan integrarse con la matriz polimérica. Entre los estudios de diferentes métodos de modificación superficial de las fibras se destacan:

- Modificación química: se encuentra el método kraft, anhídrido acético, hidróxido de sodio (tratamiento alcalino).
- Modificación física: los más notables son descargas corona con plasma frío de oxígeno donde se modifica la energía superficial de las fibras.

El pre - tratamiento en fibras vegetales es de extrema importancia, una vez, confiere una estabilidad más grande en las conexiones entre la matriz y el refuerzo, proporcionando una mejor adherencia de las fibras a la resina. Las condiciones de tratamiento como la

temperatura, tiempo y concentración de las soluciones influyen en las propiedades eficientes de los compuestos. Son varios los ejemplos en la literatura (Vázquez et al., 1997), (Kharade and Kale, 1998) que reportan la intensificación de la interface agente de refuerzo/matriz utilizando la alcalinización como el tratamiento químico más apropiado para los materiales lignocelulósicos. La figura 2.8 ilustra la conducta de las fibras de bambú antes y después del tratamiento químico.



Figura 2.8 Fibras de bambú después del tratamiento químico: Fibras sin tratamiento (a), Fibras tratadas con NaOH al 5% (b), Fibras tratadas con NaOH al 10% (c). Fuente Da Costa Júnior, 2012

El tratamiento alcalino de las fibras es una posibilidad de bajo costo. Los efectos de la mercerización como un tratamiento para mejorar las propiedades mecánicas, sobre todo la resistencia a la tracción de fibras lignocelulósicas, han sido estudiados extensivamente. La definición de la mercerización considera este un proceso en el qué, las fibras vegetales son sometidas a una interacción con la solución líquida de una base fuerte, para producir el gran entumecimiento, resultando en cambios en la estructura, en las dimensiones, en la morfología y en las propiedades mecánicas de las fibras. (Das et al., 2006) citado por (Da Costa Correia, 2011)

Después de que los tratamientos alcalinos las fibras presentan una mayor superficie de contacto, haciendo posible una mejor interacción con otros materiales. Según (Tserki et al., 2005) la mercerización es un tratamiento importante para preparar la superficie de las fibras antes de otras reacciones como el esterificación.

La figura 2.9 (a) muestra el comportamiento de la superficie de las fibras en estado natural. Estas presentan superficies cubiertas con residuos y cera vegetal, estructuras microfibrilares sin cavidades y, por tanto, menos expuestas al contacto con la matriz polimérica. Las fibras se muestran recubiertas por una capa de material denominado cutícula, identificado como

una cera de origen alifática, de naturaleza incompatible con la mayoría de los polímeros, lo que dificulta la adherencia entre el agente del refuerzo con la matriz. (Da Costa Júnior, 2012)

La figura 2.9 (b) ilustra un compuesto reforzado con las fibras en estado natural del bambú, se observa la baja interacción con la matriz, evidenciada por la menor exposición microfibrilar de las cavidades. (Da Costa Júnior, 2012)

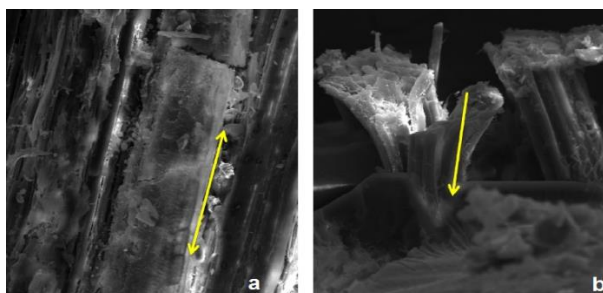


Figura 2.9 Microscopía electrónica de barrido: Fibras de bambú en estado natural (a), Compuesto polimérico reforzado con fibras de bambú en estado natural (b). Fuente Da Costa Júnior, 2012

En la figura 2.10 (a) se muestran las fibras después de un tratamiento químico con NaOH al 5%, se revela una ligera diferencia debido a la remoción parcial de los componentes no celulósicos como: ceras, pectina, hemicelulosa, lignina, etc. Ese tratamiento deja las fibras más expuestas al grado de interacción y adherencia entre las fibras y la resina (Figura 2.10 b). (Da Costa Júnior, 2012)

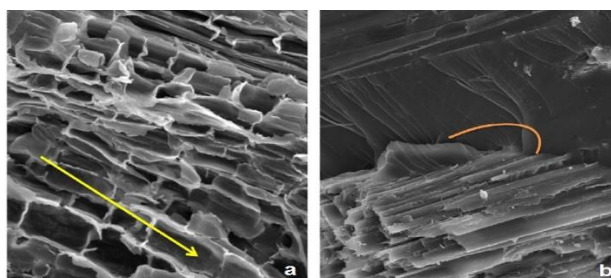


Figura 2.10 Microscopía electrónica de barrido: Fibras de bambú tratadas con NaOH al 5% (a), Compuesto polimérico reforzado con fibras de bambú tratadas con NaOH al 5% (b). Fuente Da Costa Júnior, 2012

La figura 2.11 (a) plantea la modificación más evidente de la superficie de las fibras después de un tratamiento con NaOH al 10%. De igual forma, en la figura 2.11 (b), se aprecia el mayor grado de interacción entre la matriz y las fibras, estas últimas impregnándose casi en su totalidad con la resina utilizada. (Da Costa Júnior, 2012)

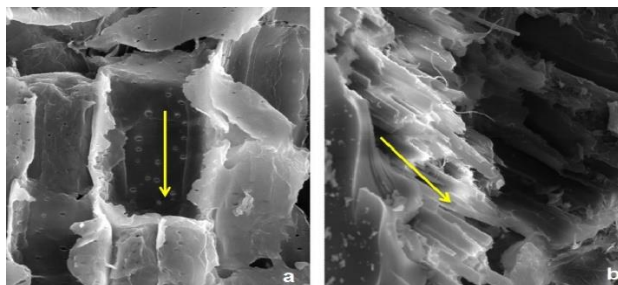


Figura 2.11 Microscopía electrónica de barrido: Fibras de bambú tratadas con NaOH al 10% (a), Compuesto polimérico reforzado con fibras de bambú tratadas con NaOH al 10% (b). Fuente Da Costa Júnior, 2012

De acuerdo con las imágenes, ambos tratamientos con NaOH al 5 y 10%, Figuras 2.10 (a) y 2.11 (a), producen modificaciones similares en las fibras, como el aumento de la rugosidad superficial, la aparición de cavidades por la remoción parcial de los constituyentes amorfos y la mayor afinidad entre la matriz y el refuerzo. Sin embargo, es evidente que el tratamiento con NaOH al 10% es el que ocasiona mayores cambios superficiales en las fibras, los que las hacen más aptas para la elaboración de materiales con características homogéneas. (Da Costa Júnior, 2012)

Estudios realizados por (Beckermann and Pickering, 2008) con fibras de bambú, usando polipropileno como matriz polimérica, confirman la mayor interacción entre el agente de refuerzo y la matriz luego del tratamiento de las fibras con NaOH al 10%. Comportamiento similar obtuvo (Geethamma, 1998) al investigar compuestos utilizando una matriz de polisopreno reforzada con fibras de coco tratadas con NaOH al 10%. Citado por (Da Costa Júnior, 2012)

- Incorporación de agentes de acoplamiento

Diversos productos químicos han sido utilizados para lograr cambios en la interface de dichos materiales; sin embargo, como lo afirma (Franco-Marqués et al., 2011) los avances más importantes usando fibras celulósicas como refuerzo de los polímeros, se alcanzaron cuando fueron añadidos agentes de acoplamiento de poliolefinas modificadas, para producir enlaces químicos entre las fibras y la matriz polimérica. Comúnmente se utilizan polietileno y polipropileno con anhídrido maleico injertado. (Pulido González et al., 2014)

El éxito del reforzamiento del polipropileno virgen y reciclado fue probado por (Sanjuan-Raygoza and Jasso Gastinel, 2009), utilizando la combinación de fibra de agave con un agente de acoplamiento comercial a base de polipropileno maleinizado (Epolene E-43).

Además del tipo de agente de acoplamiento que se emplea, otro factor importante es la cantidad o proporción que se usa en el material compuesto. Diversos autores como (Botros, 2003), (La Mantia and Morreale, 2011), (Mohebbi et al., 2011) y (El-Sabbagh, 2014), recomiendan una proporción de agente de acoplamiento entre el 2 y 8% en peso; el determinar la proporción adecuada según el tipo de polímero, fibra celulósica y agente acoplante se obtiene experimentalmente.

En la búsqueda de nuevos agentes de acoplamiento que puedan igualar o mejorar el papel de los agentes de acoplamiento conocidos, se proponen como tales, aquellos que presenten adicionalmente ventajas potenciales en degradabilidad y costo, cuyo desempeño ha sido ampliamente demostrado por (Tajvidi et al., 2006), (Sanjuan-Raygoza and Jasso Gastinel, 2009) y (Kaewkuk et al., 2013) entre otros. En este sentido, es necesario resaltar la brea natural y el éster de brea gliceromaléica (brea maleinizada), que son ampliamente utilizadas en la industria farmacéutica. (Pulido González et al., 2014)

Por su origen natural, se esperaría que la brea y sus derivados sean biodegradables, como lo afirmaron (Fulzele et al., 2002), y mediante un estudio, (Satturwar et al., 2003) demostraron que la brea en su estado natural es degradable y su compatibilidad en y con el medio ambiente fisiológico muestra una degradación más rápida "in vivo" que "in vitro" en un período menor a tres meses. En otro estudio, (Satturwar et al., 2004), comprobaron la biodegradación y biocompatibilidad "in vivo" de dicha resina.

Para la brea maleinizada, (Fulzele et al., 2003) reportaron estudios de biodegradabilidad, donde se incluye la degradación "in vitro", "in vivo" y de biocompatibilidad. Al igual que para la brea se encontró una mayor degradación "in vivo" que "in vitro", además de una biocompatibilidad razonable dentro de los límites evaluados.

2.3.4 Aplicaciones

En su tesis de pregrado (Martínez, 2008) titulada: Prototipo de un sistema constructivo para viviendas de bajo costo a partir de plástico reciclado, complementó una investigación

elaborada por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, en la cual se desarrolló un sistema constructivo de viviendas a base de muros estructurales modulares. Martínez elaboró el diseño arquitectónico de todos los elementos de una casa típica con módulos de dimensiones basadas en una serie numérica, con el propósito de lograr la compatibilidad entre todos los elementos estructurales y no estructurales.

Martínez realizó un análisis de costos con el cual concluyó que la construcción de una vivienda con el sistema de paneles plásticos reforzados con fibra de guadua ahorra, en promedio, un 27,3 % del costo total, comparada con la construcción de una vivienda tradicional de mampostería. Los análisis no tienen en cuenta algunos aspectos constructivos que favorecen aun más el sistema propuesto: la reducción en cimentación, gracias a que el material es más liviano; la reducción en uso de maquinaria, por lo que los paneles son prefabricados; los costos relacionados al ahorro en mano de obra y al mayor rendimiento, ya que una construcción con muros prefabricados requiere de menos trabajo y se construye más rápido que una de mampostería. La propuesta de vivienda resulta llamativa desde el punto de vista económico, lo cual es un buen paso en la proposición de soluciones a los problemas de vivienda del país.

Desde el punto de vista estructural, las fibras de guadua colaboran enormemente. Según Martínez, sin especificar la cantidad de refuerzo, el material compuesto de polietileno de alta densidad (PEHD) con fibras de guadua tiene un módulo de elasticidad de 2,0 GPa a 2,2 GPa y una resistencia a la tensión entre 14 MPa y 25 MPa. El autor afirma que esas propiedades son suficientes para controlar las deformaciones y resistir las cargas vivas y muertas asociadas a la vivienda. En la Figura 2.12 se muestra la simulación del compuesto PEHD - guadua para una cantidad de refuerzo entre 10 y 90% del volumen. Se puede ver que el módulo se supera rápidamente a medida que la cantidad de refuerzo se incrementa: con una fracción de volumen de 30% de fibras se duplica la rigidez requerida por Martínez. La resistencia a tensión resulta mucho mayor a lo que reporta Martínez, ya que el PEHD sin refuerzo alguno resiste un esfuerzo a la tensión de 26 MPa aproximadamente; las fibras de guadua aumentan este valor significativamente a medida que se incrementa su cantidad dentro del compuesto.

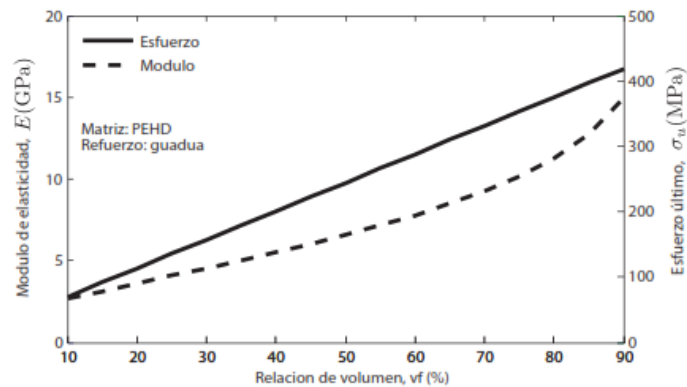


Figura 2.12 Simulación del compuesto de polietileno de alta densidad (PEHD) con refuerzo de fibras de guadua. Fuente Martínez, 2008

Se puede concluir de la Figura 2.12 que es posible construir piezas con diferentes propiedades mecánicas. Esto debe tenerse en cuenta, puesto que una construcción no tiene los mismos requerimientos estructurales en todos sus elementos. Por ejemplo, los paneles que conforman las losas de piso deben reducir la deformación y vibración con un módulo de elasticidad alto, mientras que los muros no estructurales permiten más flexibilidad.

Esta es sólo una de las posibles aplicaciones estructurales de este material, sin embargo, se ha visto que es posible utilizar las fibras de guadua como refuerzo estructural de polímeros hasta alcanzar propiedades mecánicas extraordinarias.

Los productos poliméricos fibro - reforzados son usados también en exteriores como elementos arquitectónicos que buscan un mejor confort y agrado por parte de los usuarios. Entre las principales aplicaciones están: terrazas, paseos de jardín, bordes de piscinas, portones, barandillas, mobiliario, etc. Las tablas compuestas para plataformas exteriores son reversibles, con dos acabados y se instalan fácilmente con herramientas y sujetadores comunes. (Figura 2.13) (Majewski and Błędzki, 2013)



Figura 2.13 Aplicaciones en exteriores de polímeros reforzados con fibras. Fuente Majewski and Błędzki, 2013

Otras de las numerosas aplicaciones para estos materiales son:

- Paneles para revestimientos y techos (Figura 2.14 a)
- Tableros para paredes, contornos de puertas y ventanas (Figura 2.14 b)
- Tejas (Figura 2.14 c)
- Pisos de madera plástica (Figura 2.14 d)

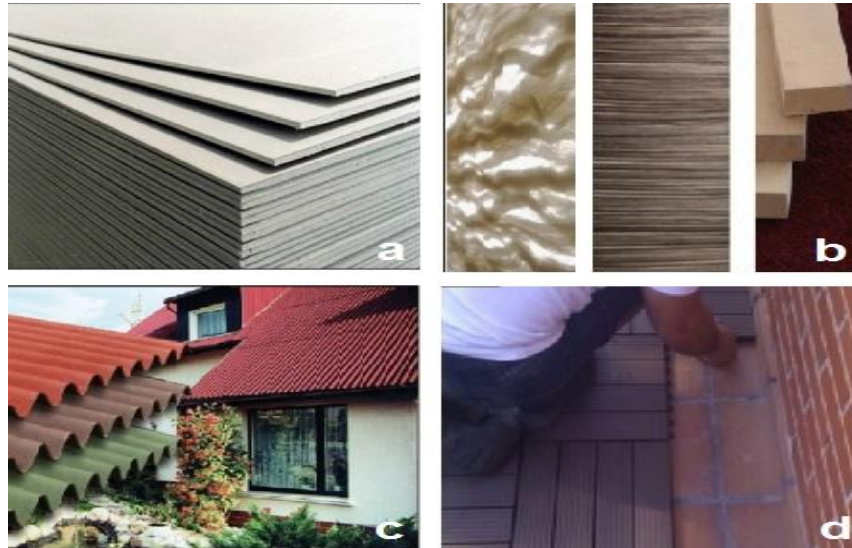


Figura 2.14 Aplicaciones de polímeros reforzados con fibras naturales en la construcción: Paneles (a), Tableros (b), Tejas (c), Pisos (d). Fuente Valarezo Jaramillo, 2013

De las aplicaciones más comunes de los plásticos fibra - reforzados esta la producción de cascos para protección de accidentes laborales, deportivos los cuales son reforzados con varias capas de fibras y encapsulados en una matriz, generalmente termoplástica. Tablas de surf, cañas de pescar, monopatines, elementos de protección deportivos (Figura 2.15) son otras de las mayores prestaciones de estos materiales.

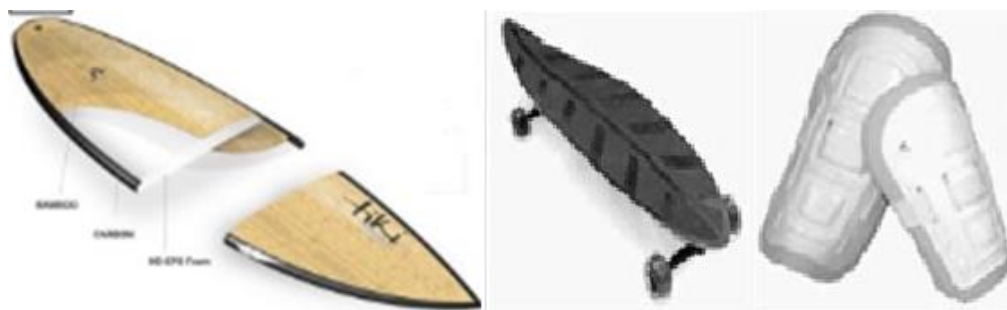


Figura 2.15 Otras aplicaciones de polímeros reforzados con fibras. Fuente Valarezo Jaramillo, 2013

Los materiales reforzados con fibras vegetales también han ingresado en el campo de la fabricación de automóviles. Esta tendencia comenzó en Europa, donde dichos materiales son usados para fabricar paneles interiores de puertas, espaldares de asientos, apoya -cabezas, guardafangos y bandejas para guardar objetos. Algunas autopartes de plástico reforzados por diferentes fibras naturales se presentan en Figura 2.16.



Figura 2.16 Autopartes del Mercedes-Benz clase S fabricadas con polímeros reforzados con fibras naturales. Fuente Majewski and Błędzki, 2013

La aeronáutica igualmente ha sido punto de llegada para los plásticos reforzados. Tal es el caso que un estudio realizado por (Lucena et al., 2009) ha incursionado en la fabricación de un material compuesto a base de fibras de bambú y una resina de epoxi vinilester A430. Esta resina es apropiada para la fabricación de piezas reforzadas con altas propiedades mecánicas, se ha comprobado que las piezas desarrolladas con estas resinas tienen baja susceptibilidad a la fractura por tensión, presentan excelente resistencia a medios alcalinos, alta resistencia térmica y resistencia a grandes cargas mecánicas dinámicas. Además, es aprobada por la agencia federal de aviación alemana, para la fabricación de piezas. Los resultados finales se están desarrollando ya que se requieren de numerosas pruebas para garantizar cifras reales. Sin embargo, con las primeras pruebas se obtuvieron resultados bastante positivos que pueden llevar a este material a remplazar materiales diariamente usados en la industria aeronáutica para la confección de elementos como timón, estabilizadores verticales, cúpulas, inversores de empuje, puertas del tren de aterrizaje, compartimentos de cargas, etc. (Figura 2.17)

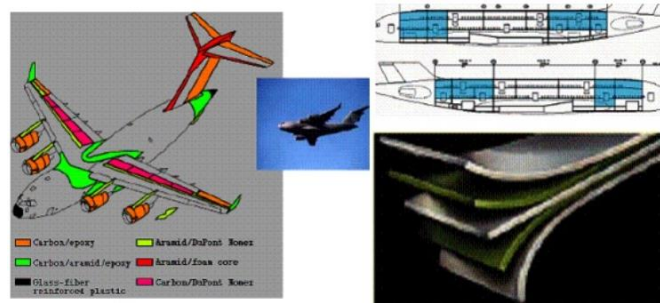


Figura 2.17 Polímeros reforzados con fibras en la aeronáutica. Fuente Valarezo Jaramillo, 2013

2.4 Concreto polimérico

De los materiales de construcción existentes, el concreto hidráulico a base de cemento Portland (CCP), es el material más utilizado para construcciones en el mundo. No obstante, presenta algunas desventajas como el grado de porosidad que afecta directamente su rendimiento y limitan sus aplicaciones; la débil adherencia a ciertos materiales; baja resistencia a medios agresivos y al agua salada; así como pobre aislamiento eléctrico. Razones por las cuales se han buscado y propuesto tecnologías alternas que toman en cuenta otros materiales, como los polímeros. Los concretos modificados con polímeros han mostrado mejoramiento en las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y a la flexión en comparación con concretos hidráulicos sin polímeros. (Martínez Barrera et al., 2013)

El concreto polimérico es un material compuesto que consta de la mezcla de una resina termo estable y agregados minerales, a diferencia del agua y el cemento tipo Portland utilizados en la elaboración del concreto hidráulico. Las propiedades mecánicas del concreto polimérico dependen de las propiedades físicas y químicas tanto de la resina como de los agregados minerales. (Mehdi, 2011) El concreto polimérico es de tres a cinco veces más resistente que el concreto hidráulico (Martínez Barrera and Brostow, 2009), pero su fragilidad en el punto de falla ha limitado su utilidad en aplicaciones donde intervienen cargas pesadas; siendo necesario mejorar la dureza y el comportamiento esfuerzo - deformación, primordialmente en lo referente al módulo de Young. Para solucionar este problema se han propuesto: a) llevar a cabo un proceso de post - curado, consistente en calentar a cierta temperatura el concreto por determinado tiempo, realizándolo por etapas, o bien b) reforzarlo

con fibras, entre las que se encuentran fibras sintéticas, naturales o de carbono; esta últimas influyen notablemente en el concreto, mejorando su capacidad y modificando su comportamiento estructural en cuanto a rigidez y ductilidad. (Valcuende et al., 2004)

Solo algunos grupos de investigación han abordado la tarea de resolver la problemática del reforzamiento del concreto polimérico, y en consecuencia la literatura es escasa. Se ha encontrado que la adición de fibras poliméricas sintéticas refuerza el carácter elastomérico de la matriz polimérica, por lo general una resina polimérica termoestable, como las resinas epoxi o las de poliéster insaturado; además de mejorar la ductilidad y disminuir el módulo de elasticidad. (Martínez Barrera and Brostow, 2009)

El uso de materia prima natural como las fibras naturales pueden ser una excelente alternativa para el desarrollo de concretos poliméricos reforzados más amigables al medioambiente. Los pocos estudios de concreto polimérico reforzado con estas fibras, contemplan el uso de fibras de piasava para disminuir el peso del concreto, mejorar el comportamiento en flexión, así como disminuir el valor al que se logra falla frágil (Reis and Carneiro, 2013); también se han utilizado fibras de bambú para mejorar la propiedades de tracción y la adhesión entre el agregado mineral y la resina polimérica, en base al poder antioxidante del bambú. (Santos Delgado et al., 2012) Por otro lado, los grupos polares en la fibra natural de sisal interactúan físicamente con la resina poliéster y retardan la reacción de curado, lo cual puede permitir la manipulación durante la elaboración del concreto polimérico, el cual en promedio polimeriza en dos horas. (Pistor et al., 2012)

2.5 Conclusiones parciales

1. Las fibras naturales presentan numerosas ventajas cuando son comparadas con sus homólogas sintéticas, pues no solo son un recurso renovable y biodegradable sino también que se encuentran en abundancia.
2. Dentro de los procesos de extracción de fibras se presentan los mecánicos, biológicos, químicos y físicos.

Con respecto a las matrices cementicias y su reforzamiento con fibras de bambú, se expone que:

1. El principal problema de los morteros y concretos reforzados con fibras naturales es la durabilidad de las fibras en las pastas, aspecto que puede mejorarse a partir de la modificación de la composición de la matriz o la modificación de la superficie de las fibras.
2. Para reducir la alcalinidad de las pastas de cemento es común el uso de diferentes cloruros, capas finas de Igol-T o negrolin, metacaolín o incluso cenizas de hojas de bambú.
3. La modificación de la superficie de las fibras de bambú se realiza a partir del lavado del material, inmersión en una solución química, la utilización de solventes o la impregnación con sustancias orgánicas como brea, aceite de linaza y otras.
4. Las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras de bambú varían cuando están en estado fresco y cuando han endurecido.
5. El contenido de fibras varía entre 1 y 2% del peso de la mezcla, nunca del volumen.
6. Los principales usos de morteros y concretos fibro - reforzados con bambú son la confección de tejas y láminas corrugadas para techos, baldosas para pisos y pavimentos, paneles ligeros para paredes y elementos para enchapados, etc.

En cuanto a matrices poliméricas, se resume que:

1. Los termoplásticos son los más empleados con refuerzo de fibras naturales.
2. La problemática fundamental del uso de fibras naturales en matrices poliméricas es la baja adherencia entre las fibras y la matriz.
3. Existen tres métodos para mejorar la adherencia en polímeros reforzados con fibras: modificación de la matriz, modificación de la superficie de las fibras e incorporación de agentes de acoplamiento.
4. El tratamiento químico a partir de una concentración de NaOH al 10% es el acertado para la modificación superficial de las fibras de bambú.
5. Los compuestos plástico fibrosos son utilizados para la confección de paneles de revestimiento y techos, pisos de madera plástica, tejas y demás elementos arquitectónicos, principalmente, en exteriores.
6. El concreto polimérico no está libre de problemáticas, sin embargo, se presenta como un material en pos de la sustentabilidad global.

Capítulo III. Tablillas (cañas) y cables de bambú en hormigón armado

El principio básico del hormigón armado consiste en el aprovechamiento de la capacidad del hormigón de resistir los esfuerzos de compresión, y la capacidad del refuerzo de soportar los esfuerzos de tracción. De acuerdo con (Lima Jr. et al., 2000) el bambú presenta la resistencia a la tracción suficiente para trabajar como el refuerzo en estructuras de hormigón armado, motivo por el cual la posibilidad de su utilización para este propósito se ha estudiado desde el principio de siglo pasado. Citado por (Lima Jr et al., 2005)

Los chinos fueron los primeros tanto en desarrollar investigaciones en este campo como también en emplear el bambú en la construcción de concreto reforzado. Según Porterfield, las primeras aplicaciones de que se tiene noticia se realizaron en 1918, entre ellas la construcción de un cuarto frío para la *International Export Ca.*, donde se emplearon varetas cuadradas de bambú de 6 mm como refuerzo de muros en concreto de 5 cm de espesor. Otras aplicaciones que datan de esa época, son la construcción por parte del gobierno chino de pilotes de fricción en concreto reforzados en bambú, para cimentar algunos puentes; o el uso de placas en concreto reforzado con bambú, para la construcción de muros de protección en ríos. (González Salcedo, 2001)

Posteriormente el bambú fue empleado como refuerzo en el concreto, durante la Segunda Guerra Mundial, en las islas del Pacífico, por las fuerzas armadas de los Estados Unidos y del Japón, en construcciones militares de diversa índole. (González Salcedo, 2001)

Barmak en 1938 publicó un artículo sobre el empleo del bambú en construcciones de madera, concluyendo, ya en su época, que la resistencia a la compresión del bambú, incluso considerada la sección plena, es mayor que la del concreto común, y que, para mayores espesores de paredes y menor diámetro externo del bambú, la resistencia por unidad de área crecerá. De lo expuesto, concluyó el autor que un elemento constructivo de bambú

resiste mejor que un elemento de sección idéntica en concreto simple y que, por ser el módulo de elasticidad del bambú semejante al del concreto, y poseyendo el bambú una resistencia, tanto a la tracción como a la compresión, superior a la del concreto, se puede emplear con ventaja en las zonas de tracción y de compresión en vigas de hormigón armado con acero obteniéndose así, vigas con menor peso propio y mayor capacidad de resistencia. Si se utiliza en sustitución de la armadura de acero en la zona de tracción, la sección del bambú debe ser como mínimo doce veces la sección del acero necesaria, en virtud del pequeño módulo de elasticidad a la tracción del bambú. (Gomes Reis Lopes, 2002)

A parte de esos trabajos, se han efectuado también numerosas investigaciones sobre el tema en China, Japón, Filipinas, Estados Unidos, México, Colombia y en países donde no hay bambú como Alemania, Italia y Egipto. Sobresale la investigación realizada por H.E. Glenn en 1944, en *Clemson Agricultural College of South Carolina*, Estados Unidos, quien construyó, como parte de su investigación, las primeras estructuras en concreto reforzado con bambú, con resultados muy poco alentadores. (González Salcedo, 2001)

Tabla 3.1 Resultados de los ensayos mecánicos de concreto reforzado con bambú. Fuente González Salcedo, 2001

Ensayo	JCW (años 20)	K. Datta (1935)	H. E. Glenn (1944)
Flexión	93.5	17.6 – 76.3	-
Esfuerzo cortante	7.26 - 8.32	-	-
Módulo de elasticidad	11.67	-	-
Tensión	98.59	162.7 – 207.0	182.8 – 351.6
Compresión	38.67	79.4 – 86.3	56.3

Nota: JCW – Jefatura de Conservación de Whangpoo, China

Los resultados de las investigaciones realizadas sugirieron que un miembro de concreto reforzado con bambú, sujeto a compresión, no es más débil que una pieza similar de concreto de igual área en la sección transversal; por el contrario, si está reforzado con bambú, debe ofrecer una mayor resistencia como resultado de la mayor resistencia a la compresión del material. Además, una pieza de concreto reforzado con bambú obviamente es más flexible que una pieza de concreto de igual sección transversal; como el bambú comparado con el concreto posee aproximadamente el mismo módulo de elasticidad, pero mayor resistencia a la compresión, sería ventajoso emplear cañas de bambú en la zona de

presión de vigas de concreto reforzado. (Hidalgo López, 1974) citado por (González Salcedo, 2001)

Ghavami en 1992 relató la realización de ensayos experimentales de losas de concreto reforzadas con bambú, en sustitución del acero, armadas con molde permanente de este mismo material. Al final, concluyó con la viabilidad del empleo del bambú como elemento de refuerzo para vigas y losas de hormigón y en estructuras espaciales, teniendo en cuenta los buenos resultados alcanzados. El autor llamó la atención para la necesidad de investigaciones futuras con el objetivo de determinar los aspectos importantes referentes al empleo del bambú como refuerzo en estructuras de hormigón y estructuras espaciales, en particular, el estudio de las conexiones de los elementos estructurales. (Gomes Reis Lopes, 2002)

Hasta el momento estos refuerzos se han realizado bien con cañas o con tablillas obtenidas al dividir longitudinalmente los tallos de mayor tamaño. Estas últimas son las más recomendadas desde el punto de vista de la adherencia, ya que las cañas completas entran en contacto con el hormigón únicamente con su superficie exterior lisa y cerosa.

3.1 Colocación del refuerzo de bambú en vigas

Según la investigación de K. Datta (1990), el sistema de colocación del refuerzo de bambú empleado en las vigas de las Figuras 3.1 y 3.2 resultó ser el más apropiado. Cuando el refuerzo de bambú se coloca como se indica en las vigas de las Figuras 3.3 y 3.4, puede asegurarse que los estribos de acero distribuidos a lo largo de la viga previenen las fisuras en el concreto. Los resultados demuestran que las vigas de concreto reforzado con bambú pueden sustituir tanto las vigas de concreto reforzado con acero como a las vigas de madera en casas pequeñas y económicas. (González Salcedo, 2001)

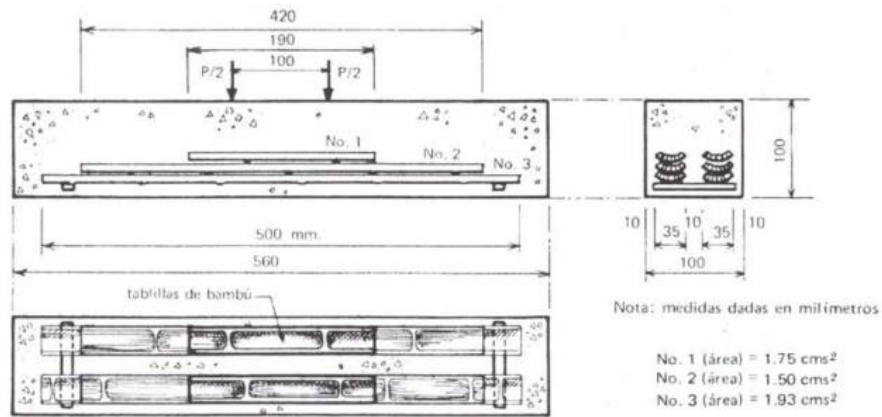


Figura 3.1 Viga (1) de hormigón reforzada con bambú. Fuente González Salcedo, 2001

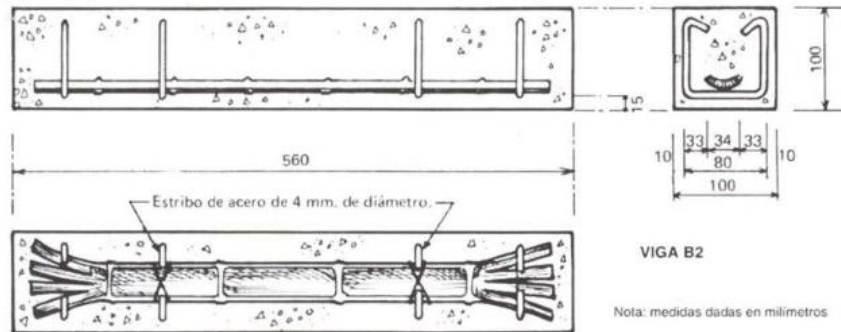


Figura 3.2 Viga (2) de hormigón reforzada con bambú. Fuente González Salcedo, 2001

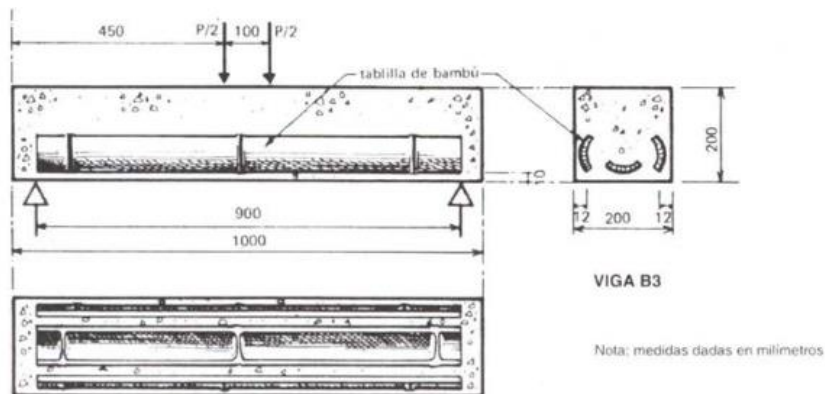


Figura 3.3 Viga (3) de hormigón reforzada con bambú. Fuente González Salcedo, 2001

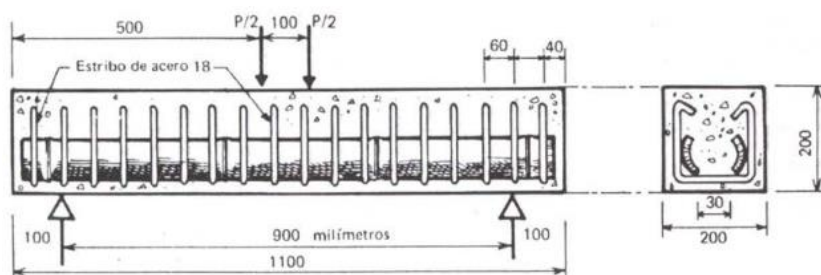


Figura 3.4 Viga (4) de hormigón reforzada con bambú. Fuente González Salcedo, 2001

El bambú como refuerzo en vigas de concreto aumenta la capacidad de carga hasta la falla final considerablemente por encima de la que puede esperarse de una viga de iguales dimensiones, pero sin refuerzo. La capacidad de carga de vigas de concreto reforzado con bambú se incrementa con el aumento del porcentaje del refuerzo de bambú hasta un valor óptimo, el cual se logra cuando el área de la sección transversal del refuerzo longitudinal de bambú es de 3 a 4% del área de la sección transversal de la viga de concreto. (González Salcedo, 2001)

El correcto espaciamiento entre las tablillas de bambú que sirven de armadura al hormigón es un factor importante para determinar la resistencia al cizallamiento de las mismas. Ensayos indican que cuando el refuerzo longitudinal principal está muy espaciado, la resistencia a flexión es perjudicada. También, cuando el refuerzo de bambú principal es usado en líneas verticales y cuando el punto en cuestión está cerca de la línea neutra, el área de hormigón de la sección horizontal de cizallamiento puede ser dañada, causando fisuras debido al cizallamiento horizontal. En muchas muestras analizadas en función a la flexión, la causa de los fallos fue atribuida al cizallamiento horizontal. (Dos Santos Ferreira, 2002)

Una alternativa de refuerzo muy prometedora lo constituyen las fibras de bambú que al ser tan flexibles se pueden confeccionar armaduras en moldes curvados. Dependiendo del refinamiento de la fibra se pueden obtener curvas con un radio muy reducido, sin perder la cohesión y con esto su principal argumento: la alta capacidad a la tensión. Con la ayuda de una resina epoxi se puede crear un sustituto de acero. Dirk Hebel, investigador de la ETH Zúrich en la sede de Singapur sorprendió con publicaciones de un desarrollo interesante con una malla de bambú para losas de concreto (Figura 3.5).



Figura 3.5 Malla de bambú comprimido y estabilizado con resinas epoxi. Fuente Hebel, Dirk

El proyecto de investigación pretende proponer una solución a la importación de acero, para reducir gastos en divisas. Sin embargo, queda la pregunta de cómo sustituir la importación de la resina epoxi, pues su uso es todavía un elemento de costo de gran importancia, por su elevado precio.

3.2 Problemas en la relación bambú - hormigón

El uso del bambú como refuerzo ha sido limitado debido a los problemas intrínsecos de este material, entre los que se destacan: la baja adherencia bambú - hormigón, la dificultad de doblamiento de las varas sin afectar sus propiedades, la variación de la resistencia a la tracción y del módulo de elasticidad en las regiones nodal e internodal del bambú y la vulnerabilidad de ese material al ataque de hongos e insectos. (Lima Jr et al., 2005)

Diversos autores han abordado la problemática de la baja adherencia entre el hormigón y el bambú. (Ghavami and Hombeck, 1981), (Beraldo, 1987), (Ferrão and Freire, 1995), (Lima Jr. et al., 1996), (Da Rosa, 2002) Sin embargo, (Czarnieski et al., 2004) verificaron que la mayoría de estos trabajos presentaban problemas en sus metodologías experimentales y mostraron que la tensión de adherencia entre el bambú y el hormigón era solo del 20% inferior en comparación con la del acero liso y el hormigón. En vigas aisladas de hormigón armado con solicitaciones elevadas, la adherencia acero - hormigón no es capaz de garantizar la transmisión de fuerzas entre estos materiales, caso en el cual es común el doblez de la armadura para la formación de ganchos de anclaje en los extremos de las

barras, estos ganchos aumentan considerablemente la dificultad de deslizamientos entre los materiales y así la transferencia de fuerzas. En el caso de elementos reforzados con bambú la dificultad de doblar las varas o tablillas sin afectar sus propiedades es un factor de restricción en su utilización. (Lima Jr et al., 2005)

Otra característica esencial utilizada en la concepción de estructuras de hormigón armado consiste en la homogeneidad del refuerzo y su isotropía en la dirección de la tensión principal de tracción, factores estos no observados en el bambú. Muchos estudios han sido dirigidos a las propiedades mecánicas del bambú y concluyen en que las resistencias a la tracción de este material en la región nodal e internodal son de 97 a 277 MPa, respectivamente, y que los módulos de elasticidad en dichas regiones son, respectivamente, de 13 y 23 GPa. (Lima Jr. et al., 2000) La variación de resistencia a la tracción a lo largo de las varas de bambú hace que las estructuras de hormigón armado reforzadas con este material colapsen en regiones que no son, necesariamente, las más solicitadas, generando gran dificultad en su dimensionamiento. Es verificado que la variación en el módulo de elasticidad genera secciones transversales con baja rigidez, en las cuales ocurre concentración de deformaciones y, a su vez, formación de fisuras con grandes aberturas; en este sentido, se destaca que, en gran parte, las fisuras de flexión que surgen en las vigas de hormigón reforzadas con bambú ocurren en las secciones transversales donde las varas presentan los nudos. Una técnica simple que puede minimizar los problemas antes citados es la utilización de un número mayor de tablillas de bambú con las regiones nodal e internodal intercaladas; sin embargo, esta solución dificulta la determinación de la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad reales del refuerzo en una sección transversal. (Lima Jr et al., 2005)

Igualmente, la utilización de bambú como refuerzo en elementos de hormigón trae consigo otra serie de problemáticas relacionadas con la interfaz bambú - hormigón, así como con las características propias de la materia prima natural. Entre las mismas se presentan:

3.2.1 Absorción de agua

Una de las principales desventajas del bambú cuando es utilizado como refuerzo en el hormigón es la absorción de agua. El bambú cuando es cortado y dejado a temperatura

ambiente contiene entre 12 y 20% de humedad por unidad. En un caso más específico, los culmos de la especie *Dendrocalamus strictus* con 2,5 años de edad pueden absorber entre 51 y 55% de agua después de cuatro días de inmersión y entre 57 y 64% después de los siete días de inmersión. (Dos Santos Ferreira, 2002)

Estudios como el de Ghavami en 1994 se han encaminado hacia la búsqueda de impermeabilizantes capaces de mejorar el problema de absorción, destacándose la eficacia del negrolin. Durante su investigación, el bambú fue inmerso durante 96 horas en agua, después de ser tratado con negrolin, y presentó una tasa de absorción de apenas un 4%. (Dos Santos Ferreira, 2002)

Otros impermeabilizantes que también fueron estudiados son la emulsión asfáltica y algunos barnices. Lo importante es que el producto a ser impregnado cumpla con ciertas características como ser insoluble e inalterable en agua, la posibilidad de secar lo más rápido posible y que no debe producir reacciones químicas ni con el bambú ni con el hormigón. (Dos Santos Ferreira, 2002)

3.2.2 Variación dimensional

Las variaciones dimensionales pueden ocurrir en el bambú debido a la rápida absorción y liberación de agua. El bambú no impermeabilizado absorbe humedad después de estar embebido en el concreto. La tensión interior del concreto puede hacerse tan alta, de acuerdo con la dimensión de la sección transversal del bambú, que puede causar fisuras en el recubrimiento del concreto fresco; posteriormente con el tiempo el bambú se contrae en grado mayor y más rápidamente que el concreto, perdiendo la adherencia con el concreto. (González Salcedo, 2001)

Varios trabajos han sido orientados con la intención de superar este problema. Gran parte de ellos han tenido como enfoque principal la disminución de las alteraciones volumétricas del bambú a través de un bloqueo del paso del agua por este material, y se sugiere también el uso de tratamientos químicos sobre el bambú para hacerlo más impermeable; sin embargo, el empleo de productos químicos puede encarecer el producto final obtenido. (González Salcedo, 2001)

El bambú presenta la misma variación de las maderas convencionales, es decir, una variación lineal de 5% en la dirección radial y de 0,5% en la dirección longitudinal. Antes de cualquier tratamiento impermeabilizante es necesario conocer si alguna parte absorbe más que otras, para entonces aplicar tratamientos diferentes, en función del porcentaje de absorción. (Dos Santos Ferreira, 2002)

Por tanto, es recomendable el uso de impermeabilizantes sobre el bambú, conjuntamente con un hormigón de secado rápido, a fin de prevenir fisuras. Así mismo la inmersión en agua, de los culmos tratados con impermeabilizantes, durante dos o tres días antes de incorporarlos al hormigón para evitar la absorción de agua de la mezcla. (Dos Santos Ferreira, 2002)

3.2.3 Adherencia

La adherencia depende principalmente del grado de saturación de los culmos después de endurecido el hormigón, de la extensión y proporción de retracción de los culmos, de las asperezas o salientes de las tablillas, de la proporción bambú - hormigón y de la variación de la temperatura. (Dos Santos Ferreira, 2002)

En Jordania (Krishnamurthy, 1986), estudió el uso del bambú como sustituto del acero de refuerzo convencional. La investigación se concentró en mejorar la adherencia entre el bambú y la matriz de cemento, propuso tres técnicas basadas en materiales baratos y fácilmente disponibles. La primera técnica consistió en aplicar al bambú un material bituminoso y adherir arena para lograr una superficie rugosa. En la segunda técnica se aplicó el mismo material bituminoso y se colocaron pequeños clavos a cada 75 mm. Finalmente, la tercera consistió en rodear al bambú con una soga impregnada del material bituminoso, al tródo de las corrugaciones en las varillas de acero. Se fabricaron 12 vigas de 100x200x1200 mm con porcentajes de refuerzo de bambú igual a 1, 2, 3 y 4%. Se observó que todas las vigas desarrollaron grietas por flexión hasta el momento de su falla y las deflexiones se incrementaron considerablemente a partir de la primera grieta. No se reporta deslizamiento del bambú en ningún caso, sin embargo, según el investigador la tercera técnica desarrolla una mejor adherencia, los resultados encontrados muestran que los

porcentajes de refuerzo que proporcionan una mayor resistencia a flexión son el 3 y 4%. (Juárez Alvarado, 2002)

De igual forma, con el objetivo de verificar la adherencia entre el bambú y el concreto, Salgado, en el 2000, comparó diversos tratamientos empleados en tablillas de bambú enclavadas en concreto, por medio de ensayos de arrancamiento. Se utilizaron tablillas sin tratamiento, tablillas con alquitrán y arena, tablillas envueltas en alambre de púas, taladros con grapas de cerca y también con ranuras en la cáscara, todos estos métodos considerados baratos y fáciles de aplicar. El autor concluyó que el tratamiento que presentó mayor resistencia a la adherencia, en relación a las fuerzas de que se ha aplicado, fue el del alquitrán con arena, seguido de grapa de cerca y de alambre de púas. (Gomes Reis Lopes, 2002)

La mayor parte de los investigadores han centrado sus experimentos en buscar una solución al problema de la adherencia, coincidiendo, como es lógica, que el bambú debe recubrirse con una sustancia impermeable con el fin de evitar que absorba el agua de la mezcla de concreto; muchos de estos investigadores, en su afán de dar una solución al problema, olvidaron que la proyección de estas investigaciones es el usuario de pocos recursos económicos y recomiendan tratamientos tan sofisticados y costosos, que en la mayoría de los casos resulta mucho más económico el empleo de acero que el de bambú. (Hidalgo López, 1978) citado por (González Salcedo, 2001) Entre los tratamientos propuestos están:

- Recubrir las tablillas de refuerzo con una capa muy delgada de emulsión asfáltica como impermeabilizante; este tratamiento tiene el peligro de que el usuario aplique una mayor cantidad de emulsión, obteniéndose un efecto contrario por lubricación de refuerzo, perdiendo totalmente su adherencia. También se ha sugerido el uso de pinturas y barnices, que además de costosos corren el mismo peligro en su aplicación.
- Tratamiento por inmersión del refuerzo de bambú en una solución al 2% de cloruro de zinc, o el recubrimiento del mismo con un adhesivo de neopreno sobre el cual se rocía arena gruesa con el fin de lograr mayor adherencia; este tipo de adhesivo no se consigue fácilmente en el mercado y su costo es muy elevado.
- Usar como refuerzo principal medios tallos, es decir, dividiéndolos longitudinalmente en dos partes, los cuales deben secarse previamente hasta un contenido de

humedad del 20%, después, sus extremos, en una longitud de 25 cm se impregnan con un adhesivo, ya sea una resina poliestérica o epóxica, sobre la cual se rocía arena fina o polvo fino de sílice para lograr mayor adherencia. Posteriormente, la parte restante se sumerge por espacio de cuatro días en una mezcla 1:1 de aceite de linaza y trementina.

- Recubrimiento completo del refuerzo de bambú con resinas epóxicas o poliestéricas, cuyo costo de adquisición es elevado.
- Tratamiento de azufre, arena para recubrir cañas de bambú que se utilicen como refuerzo; el proceso seguido en sus experimentos es el siguiente: se perforan parcialmente los tabiques de los nudos, luego se remueve la cutícula o parte brillante del bambú con un chorro de arena a presión (*sandblasting*), después de lo cual se envuelve con alambre con el fin de evitar el aumento de volumen, finalmente se sumerge en azufre derretido a una temperatura de 49°C.
- Recubrimiento de los culmos con alambre de púas (Figura 3.5), con cuerda impregnada en alguna solución asfáltica y rociada con arena.
- Utilización de los propios nudos del bambú para aumentar la superficie de contacto con el hormigón.
- Otros mencionados anteriormente.

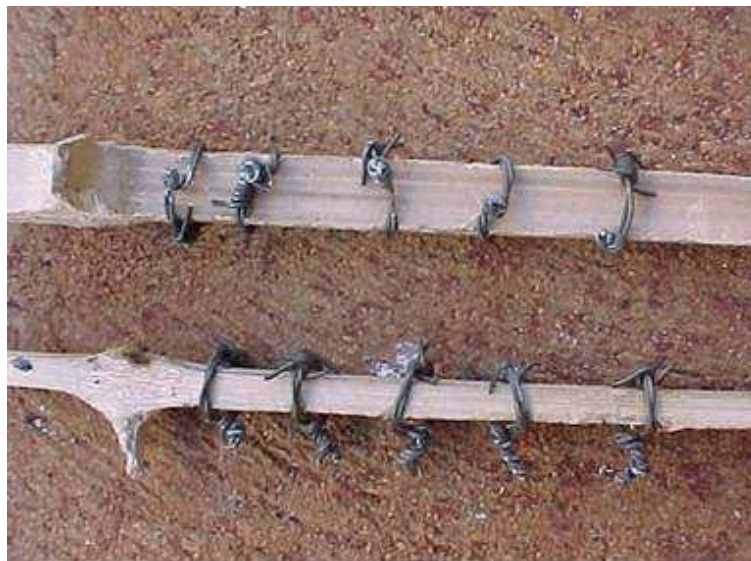


Figura 3.5 Tablillas de bambú con recubrimiento de alambre de púas. Fuente (Dos Santos Ferreira, 2007)

Con lo tratado anteriormente se puede concluir que el empleo de una mezcla de concreto muy rica, estribos de acero y la impermeabilización de las cañas de bambú del refuerzo previenen la destrucción del recubrimiento de concreto como resultado del hinchamiento del refuerzo de bambú.

3.3 Principales conclusiones de investigaciones realizadas

Con la revisión de la información más reciente sobre el tema, como los informes sobre una serie de experimentos realizados bajo la dirección del profesor H. E. Glenn, la investigación llevada a cabo por Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira, así como por Humberto C. Lima Júnior es posible llegar a conclusiones generales en el uso de bambú como refuerzo en vigas de hormigón. A continuación, se suministra un resumen de las conclusiones obtenidas como resultado de los ensayos de las diversas vigas incluidas en los estudios.

- El refuerzo de vigas de concreto con bambú no impide la fisuración o resquebrajadura del concreto bajo cargas que excedan a aquella que pueda esperarse sea soportada por elementos de concreto sin armar, de las mismas dimensiones.
- La capacidad de carga de las vigas de concreto armado con bambú aumenta con el mayor refuerzo del porcentaje de bambú, hasta un valor óptimo. Este valor óptimo se alcanza cuando el corte transversal del esfuerzo longitudinal de bambú es 3 al 4 % de la sección transversal del concreto de la viga.
- Las vigas de concreto con refuerzo longitudinal de bambú pueden emplearse para soportar con seguridad cargas dos a tres veces mayores que las que pueden esperarse en vigas de las mismas dimensiones sin refuerzo.
- Las vigas de concreto reforzado con bambú sin secar presentan capacidades de carga ligeramente mayores que iguales secciones reforzadas con bambú seco. Esto no es válido hasta tanto el bambú no se haya secado dentro del concreto cuando se le aplique la carga.
- La capacidad de carga de los elementos de concreto reforzado con bambú varía con las dimensiones de esos elementos.

- La resistencia unitaria del refuerzo longitudinal de bambú, en los elementos de concreto, disminuye con el aumento del porcentaje de refuerzo.
- La tensión máxima del bambú en el refuerzo de vigas de concreto no es afectada por cambios en la sección transversal de la viga, mientras las proporciones entre el ancho y las alturas de la viga sean constantes, pero depende de la cantidad de bambú empleada en el refuerzo.

3.4 Principios de diseño y construcción recomendados para concreto reforzado con bambú

El conocimiento de los resultados en investigaciones realizadas, permite la recopilación de información para obras futuras con el mismo propósito, o en la implementación del material como tal, concreto reforzado con bambú, para la construcción de viviendas, instalaciones agropecuarias y otros usos de la Ingeniería Civil. Algunas consideraciones en el uso del bambú como refuerzo para elementos de hormigón se proponen a continuación:

- En elementos importantes de hormigón no se recomienda el empleo de cañas completas verdes, como refuerzo del material. En losas de concreto y elementos secundarios, pueden usarse con éxito estas cañas sin estacionar, cuando los diámetros no exceden los cuartos de pulgadas. Cuando sea posible, el bambú empleado como refuerzo de elementos de concreto sujeto a flexión, deberá ser cortado y estacionado de tres semanas a un mes antes de su empleo.
- Cuando se empleen cañas de bambú enteras completamente estacionadas, para el refuerzo de elementos importantes de concreto sometidos a flexión, es recomendable el uso de algún tipo de impermeabilización.
- Se recomienda el empleo de listones verticales de bambú a fin de soportar las tensiones diagonales de los elementos sometidos a flexión, cubriendo las partes de las vigas en las cuales los esfuerzos cortantes son grandes y donde sea poco práctico doblar los esfuerzos longitudinales con este objeto.
- El adecuado esparcimiento de los refuerzos de bambú es muy importante. Los ensayos indican que cuando el principal refuerzo longitudinal de bambú está muy

poco espaciado, la resistencia del elemento a la flexión queda adversamente afectado.

- Al colocar el refuerzo de bambú debe tomarse la precaución de alternar los extremos superiores e interiores de las cañas de bambú en todas las hileras.

3.5 Cables de bambú

Con los temas analizados en función, principalmente, de los problemas presentados con respecto al bambú, especialmente, en vigas de importancia estructural, su uso como refuerzo del concreto, ya sea en tablillas o cañas, puede resultar inoperante y antieconómico, siendo necesario desarrollar nuevas técnicas de construcción con bambú (Hidalgo López, 1978), o desarrollar nuevas teorías de diseño, basadas inicialmente en el diseño elástico. (González Salcedo, 2000)

Estas nuevas técnicas corresponden al empleo de cables hechos con bambú como refuerzo del concreto, en reemplazo de varillas de acero, y de las mismas tablillas o cañas de bambú; superando con la mayoría de las dificultades o problemas descritos de limitación en la adherencia entre los dos materiales (bambú y concreto) y el área, proporcionando seguridad en la construcción de pequeñas estructuras para uso rural en concreto y de elementos prefabricados. (González Salcedo, 2001)

Desde los Incas hasta la cultura asiática, el bambú lleva siglos integrado en la vida cotidiana de muchas civilizaciones. Su uso tan versátil lo ha convertido en materia prima ideal para la elaboración de tejidos, diversos productos de artesanía o cuerdas para sus arcos. La experiencia demuestra que la resistencia aumenta al utilizar las cintas de la zona externa del bambú, permitiendo de ese modo dar el salto a su aplicación estructural como cordeles de gran resistencia para amarrar otras estructuras. (Victorino, 2016)

Con el tiempo, los chinos desarrollaron dos métodos que les permitieron aumentar el diámetro de estas cuerdas. Uno de estos métodos es por torsión de las cintas (Figura 3.6), similar al que actualmente se emplea en la fabricación de cuerdas de cáñamo. El otro consiste en trenzar tres cintas de 3 mm de espesor alrededor de otra cinta a la que previamente se le había retirado la parte externa y cerosa. De ese modo esa tira central

ejerce de núcleo carnoso que se ajusta al trenzado que lo rodea una vez sometido el cable a la tensión. Las cuerdas obtenidas solían tener un diámetro de 5 cm, y se usaban entre otras cosas para arrastrar sus barcos contra corriente en los ríos de China. (Victorino, 2016)

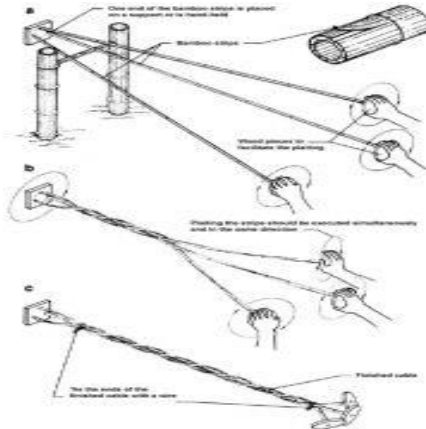


Figura 3.6 Trenzado de cable de bambú. Fuente Victorino, 2016

El trenzado del bambú ha tenido muchas aplicaciones, pero su período dorado sin duda llegaría en la construcción de puentes. Casi todas las civilizaciones se han visto en mayor o menor medida enfrentadas a importantes obstáculos geográficos. China, con sus picos montañosos y anchos ríos, o los Incas, contaban todos ellos con el mismo material, el bambú, para nunca mejor dicho tender puentes colgantes de diversos diseños muy avanzados (Figura 3.7). Las luces a vencer solían superar los 100 m, por lo que usaban grandes cables de bambú obtenidos por torsión de varias cuerdas trenzadas hasta alcanzar diámetros entre los 20 y 30 cm. (Victorino, 2016)



Figura 3.7 Puente Anlan, China. Fuente Victorino, 2016

Con el fin de establecer una comparación entre el empleo de tablillas y cables hechos con cintas de guadua como refuerzo en el concreto, Hidalgo en 1978 ensayó un total de 26 vigas de 2,20 metros de largo por 12 cm de ancho y 20 cm de altura; las vigas se fundieron en grupos de tres, en cada uno de los cuales se utilizaron como refuerzo tablillas y cables de la misma guadua, distribuyendo el refuerzo en tablillas colocadas horizontalmente en la primera viga, tablillas colocadas verticalmente en la segunda viga, y cables en la tercera. El refuerzo superior correspondió a 2 tablillas de 12 mm de ancho por 5 cm de espesor promedio, sin tener en cuenta la edad. (González Salcedo, 2001)

Todas las vigas se ensayaron a los 28 días de fundidas; con este propósito se colocaron sobre soportes con una luz o separación de 2 m entre centros y luego sometidas a una carga concentrada en el centro de la viga. Los resultados obtenidos se muestran en el Tabla 3.2. (Hidalgo López, 1978) citado por (González Salcedo, 2001)

La máxima adherencia en el concreto, obtenida con los cables de guadua fue de 1,82 MPa y la mínima de 0,64 MPa; en las tablillas la adherencia fue de 0,51 MPa. (González Salcedo, 2001)

Tabla 3.2 Resultados en kN obtenidos por Hidalgo. Fuente González Salcedo, 2001

Refuerzo	Edad	Área (cm ²)	Edad	Área (cm ²)	Edad	Área (cm ²)	Edad	Área (cm ²)
	1 año		2 años		3 años		4 años	
Tablillas horizontales	81.6	4.3	-	10.6	181.4	10.2	176.8	3.7
Tablillas verticales	96.1	4.3	158.7	10.1	176.9	10.3	160.3	4.2
Cables	117.9	4.5	172.3	9.0	204.1	10.5	172.3	4.8

Teórica y experimentalmente se ha comprobado que el empleo de cables elaborados con cintas de guadua o de cualquier otro bambú, como refuerzo en el concreto, supera muchas de las dificultades que hasta ahora han hecho inoperantes el uso de tablillas y de cañas de bambú como refuerzo en el concreto, comprobándose que tienen mayor resistencia a la tracción, mayor adherencia con el concreto por tener menores cambios dimensionales y mayor capacidad de refuerzo (González Salcedo, 2001)

Las principales conclusiones al uso de los cables de bambú como refuerzo en el concreto son:

- Un cable hecho con cintas de guadua tiene mayor resistencia a la tracción que una tablilla de igual área transversal, por esta razón la capacidad de la carga de las vigas reforzadas con cables de guadua es mayor que la reforzada con tablillas, como se ha comprobado en estos experimentos.
- La adherencia de los cables de guadua con el concreto es mayor que la de las tablillas y cañas de bambú debido a las entrantes y salientes que forman las cintas. Esta adherencia puede incrementarse utilizando cintas más anchas, o aumentando el número de cintas, o adicionando piedras redondas alargadas con el fin de formar protuberancias.
- El cambio del diámetro del bambú en las cintas como consecuencia de la humedad es del orden del 3,5%, deduciéndose que no es necesario aplicar en los cables de bambú ningún tipo de tratamiento impermeabilizante de los recomendados para las tablillas o cañas que se utilicen como refuerzo. Sin embargo, es necesaria la inmunización. Según Masani (1974) el uso de inmunizantes en el bambú prolonga la vida del bambú dentro del concreto hasta 60 años, en comparación con la duración de 20 años obtenida por no implementarse.

3.6 Conclusiones parciales

De la sustitución del acero de refuerzo por tablillas de bambú en hormigón armado se plantea que:

1. La capacidad de carga de vigas de concreto reforzadas con bambú se incrementa con el aumento del porcentaje del refuerzo de bambú hasta un valor óptimo, recomendado entre 3 y 4% del área de la sección transversal del elemento.
2. Los principales problemas bambú - hormigón son la adherencia, absorción de agua y variación volumétrica.
3. Los cables de bambú se presentan como alternativa para la solución de las deficiencias de las tablillas de bambú como la adherencia y el área transversal.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

1. El bambú puede ser caracterizado como un excelente material de construcción. Su forma tubular le confiere un radio de giro y una esbeltez muy favorables en comparación con secciones de madera y acero de igual peso. De acuerdo a las investigaciones realizadas su resistencia a la tracción oscila entre los 82 y 297 MPa, los valores de pruebas a compresión se encuentran entre los 27 y 46 MPa, y los ensayos a flexión expresan resultados entre los 75 y 124 MPa; tales valores dependen tanto de la edad al realizar el corte como de la especie, el contenido de humedad, la disposición de los culmos y, principalmente, de sus fibras.
2. El uso de fibras de bambú está condicionado por su biodegradabilidad, abundancia, bajo costo y densidad, así como por no generar residuos ni ser tóxicas. La experiencia e investigación han establecido, para estas fibras, una resistencia a la tensión entre los 50 y 769 MPa; y un módulo de elasticidad variante entre 8 y 46 GPa, estas diferencias están condicionadas por factores antes mencionados y en especial por el método de extracción de las mismas. Al combinar matrices cementicias con las fibras de bambú el principal obstáculo es la durabilidad de estas frente a la alta alcalinidad del cemento, sin embargo, las propiedades de los morteros u hormigones varían desde su estado húmedo hasta cuando han endurecido, siempre teniendo presente que la adición de fibras se encuentre entre 1 y 2% del peso de la mezcla, nunca del volumen. Con respecto a las matrices poliméricas reforzadas con fibras de bambú, las mismas se enfrentan a la baja adherencia entre los componentes de la mezcla, destacándose el tratamiento superficial de las fibras con NaOH al 10% para la conformación de mejores productos.

3. Para la producción de elementos estructurales como vigas de hormigón reforzadas con tablillas de bambú en sustitución del acero, el refuerzo no representará un valor menor o mayor que el 3 y 4%, respectivamente, de la sección transversal del elemento, con el objetivo de lograr un aumento de la capacidad de carga de la unidad con respecto a otras no reforzadas. El uso de cables de bambú en el hormigón es una solución viable para los problemas de adherencia y área de sección que representan las tablillas de la planta.

Recomendaciones

Con el objetivo de poner en práctica los criterios antes citados se recomienda:

Realizar los ensayos pertinentes para poder caracterizar las especies de bambú de Cuba, en función de su utilización como material de refuerzo.

Ejecutar los experimentos de laboratorio incorporando fibras de bambú como refuerzo en morteros de cemento Portland y en cemento de bajo carbono (LC3).

Investigar la durabilidad de las fibras de bambú sometidas al medio alcalino del concreto y a pruebas de deterioro acelerado, cuando es tratada con agentes protectores, tales como polímeros. Se han realizado pruebas preliminares de absorción de agua en fibras recubiertas con alcohol polivinílico, y se ha conseguido reducir el porcentaje de absorción a 50% respecto al peso seco de la fibra. Lo que resulta alentador, ya que la parafina sólo redujo la absorción de agua en 61%.

Diseñar mezclas de concreto con adición y remplazo del cemento por ceniza de hojas de bambú.

Estudiar el análisis de la interacción suelo - ceniza de bambú para la estabilización de suelos lateríticos en la construcción de carreteras, evaluando índices de plasticidad, CBR, fuerza de cizalladura, entre otros.

Investigar las propiedades dinámicas de los concretos con fibras naturales para su aplicación en estructuras sismo - resistentes.

Referencias bibliográficas

- AGOPYAN, V., SAVASTANO, J. H., JOHN, V. M. & CINCOTTO, M. A. 2005. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. *Cement & Concrete Composites* 27, 527-536.
- AMIGÓ, V., SALVADOR, M. D., SAHUQUILLO, O., LLORENS, R. & MARTÍ, F. 2007. Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos *Quinto Congreso Internacional de Fibras Naturales*.
- ARBOLÁEZ ARCE, A. 1997. Morteros reforzados con fibras de bambú. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 50, 131-151.
- ASHBY, M. F. 2011. Materials selection in mechanical desing.
- BAILLIE, C. 2004. Green composites. Polymer composites and the environment.
- BALAGURU, P. N. & SHAH, S. P. 1992. Fiber-reinforced cement composites. *New York: McGraw Hill*.
- BECKERMANN, G. W. & PICKERING, K. L. 2008. Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: Fibre treatment and matrix modification. *Composites: Part A*, 39, 979-988.
- BÉGUIN, J. 2011. Los materiales compuestos. Dinamismo e innovación.
- BERALDO, A. L. 1987. Bambucreto - o uso do bambu como reforço do concreto. *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. Jundiaí.
- BERALDO, A. L. 1997. Compositos biomassa vegetal cimento. 1-48.
- BERALDO, A. L. 2004. Composito ligero partículas de Guadua. *Seminario Internacional de Guadua*. Pereira, Colombia.
- BERALDO, A. L. & AZZINI, A. 2004. *Bambu características e aplicacoes*, Guaíba, Rio Grande.
- BISWAS, S. & SATAPATHY, A. 2010. A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo-epoxy and glass-epoxy composites. *Materials and Design*, 31, 1752-1767.
- BLEDZKI, A. K. & FARUK, O. 2004. Woodfibre reinforced polypropylene composites in an injection moulding process. *Polymer Plastics Technology and Engineering*, 42, 3.

- BONILLA, O. 2009. Extracción y caracterización de la fibra de la hoja de la lengua de suegra (sansevieria trifasciata). *Revista Politécnica*, 30.
- BONSIEPE, G. 1983. *A "tecnologia" da Tecnologia*, Sao Paulo.
- BOTROS, M. 2003. Development of new generation coupling agents for wood-plastic composites.
- BRENT STRONG, A. 2006. *Plastics: materials and processing*. Pearson Prentice Hall.
- BRIEF, L. 2011. Opportunities in natural fiber composites.
- CALLISTER, W. 2007. *Materials science and engeneering: an introduction*.
- CARDONA CASTRO, D. F. 2013. *Caracterización de la ceniza de hojas de bambú y su influencia como material puzolánico en el concreto* Universidad EAFIT.
- CLARAMUNT, J., ARDANUY, M., GARCÍA HORTAL, J. A. & TOLEDO FILHO, R. D. 2011. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement & Concrete Composites*, 33, 586-595.
- CORREA MORAIS, W. W. 2011. *Propiedades físico-mecánicas de chapas aglomeradas produzidas com bambu, pinus e eucalipto*. Universidad Federal de Santa María, Brasil.
- COUTTS, R. S. 2005. A review of australian research into natural fibre cement composites. *Cement & Concrete Composites*, 27, 518-526.
- CZARNIESKI, C. J., MESQUITA, L. P., BRAGA FILHO, A. C., WILLRICH, F. L., LIMA JR., H. C. & BARBOSA, N. P. 2004. Avaliação da aderência bambu-concreto. *Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural*. Mendoza.
- CHANDRAMOHAN, D. & MARIMUTHU, K. 2011. A review on natural fibers. *International J. Research & Reviews*, 8, 194.
- CHOUDHURY, A. 2008. Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. *Materials Science and Engineering: A*, 492-500.
- DA COSTA CORREIA, V. 2011. *Producao e caracterizacao de polpa organossolve de bambu para reforco de matrizes cementícias*. Universidade de Sao Paulo.
- DA COSTA JÚNIOR, A. E. 2012. *Estudo das propriedades térmicas e mecânicas de biocompósitos com matriz polimérica derivada do lcc suportados em fibras de bambu*. Universidade Federal do Ceará.
- DA ROSA, S. P. A. P. 2002. *Análise teórica e experimental de colunas de concreto armado com bambu*.
- DAS, M. & CHAKRABORTY, D. 2007. Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, 107, 522-527.

- DAS, M., PAL, A. & CHAKRABORTY, D. 2006. Effects of mercerization of bamboo strips on mechanical properties of unidirectional bamboo novolac composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 100, 238.
- DELVASTO, S., BOTACHE, C. A., ALBÁN, F., GUTIERREZ, R. M., PERDOMO, F., SEGOVIA, F. & AMIGÓ, V. 2004. Effect of fique fiber surface chemical treatments on the physical and mechanical properties of the fiber subjected to aggressive medium. *Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitacoes e Infra-Estrutura de Interesse Social*. Sao Paulo, Brasil.
- DESHPANDE ABHIJIT, P., RAO BHASKAR, M. & RAO LAKSHMANA, C. 2000. Extraction of bamboo fibers and their use as reinforcement in polymeric composites *Journal of Applied Polymer Science* 76, 83-92.
- DHAKAL, H., ZHANG, Z. & RICHARDSON, M. 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67, 1674-1683.
- DOS SANTOS FERREIRA, G. C. 2002. *Vigas de concreto armadas com bambu*. Universidade Estadual de Campinas.
- DOS SANTOS FERREIRA, G. C. 2007. *Vigas de concreto armadas com taliscas de bambu Dendrocalamus Giganteus*. Universidade Estadual de Campinas.
- EL-SABBAGH, A. 2014. Effect of coupling agent on natural fibre in natural fibre/polypropylene composites on mechanical and thermal behavior. *Composites Part B: Engineering.*, 57, 126-135.
- ESPINOZA BELTRÁN, G. E. & HIDALGO PACHECO, J. A. 2016. *Caracterización de materiales compuestos para la aplicación en la carrocería del vehículo monoplaza tipo Fórmula SAE*. Universidad Politécnica Salesiana.
- ESTRADA MEJIA, M. 2010. *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Universidad de Los Andes.
- ESTRADA MEJIA, M., RAMIREZ, F., MALDONADO, A. & CORREAL, J. F. 2010. Caracterización mecánica de las fibras de bambú colombiano, *Guadua angustifolia*.
- FARUK, O., BLEDZKI, A., FINK, H. & SAIN, M. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37, 1552-1596.
- FERRÃO, A. M. & FREIRE, W. J. 1995. Aderência entre bambu e concreto: teste de arrancamento com taliscas de *Bambusa tuldoidea*. *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*. Belo Horizonte, Brazil.
- FOMIN, V. A. 2001. Biodegradable polymers, their present state and future prospects. *Progress In Rubber and Plastics Technology*, 17, 186-204.

- FOWLER, P. A., HUGHES, T. M. & ELIAS, R. M. 2006. Review biocomposites: Technology, enviromental credentials and market forces. *J. Sci. Food & Agriculture*, 86, 1781.
- FRANCO-MARQUÉS, E., MÉNDEZ, J. A., PÉLACH, M. A., VILASECA, F., BAYER, J. & MUTJÉ, P. 2011. Influence of coupling agents in the preparation of polypropylene composites reinforced with recycled fiber. *Chemical Engineering Journal*, 166, 1170-1178.
- FULZELE, S. V., SATTURWAR, P. M. & DORLE, A. K. 2002. Polymerized rosin: novel film forming polymer for drug delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, 249, 175-184.
- FULZELE, S. V., SATTURWAR, P. M. & DORLE, A. K. 2003. Study of the biodegradation and in vivo biocompatibility of novel biomaterials. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 20, 53-61.
- GASSAN, J. 2002. A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33, 369-374.
- GASSAN, J. & BLEDZKI, A. K. 1999. Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. *Composites Science and Technology*, 59, 1303-1309.
- GEETHAMMA, V. G. 1998. Composite of short coir fibres and natural rubber: effect of chemical modification, loading and orientation of fibre. *Polymer Oxford*, 39, 1483-1491.
- GEORGE, J., SREEKALA, M. S. & THOMAS, S. 2001. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering & Science*, 41, 1471-1485.
- GHAVAMI, K. & HOMBECK, R. V. 1981. Mechanical properties and water-repellent treatment of bamboo. *Latin American Symposium Rational Organization of Building Applied to Low Cost Housing*. São Paulo, Brazil.
- GOMES REIS LOPES, W. 2002. *Solo-cimento reforçado com bambu: Características físico-mecánicas* Universidade Estadual de Campinas.
- GONZÁLEZ SALCEDO, L. O. 2000. Estado de arte y aportes del proyecto semilla 99CG5108: bases para el diseño de elementos estructurales en concreto, reforzados con bambú, usando especies del Valle del Cauca. *I Encuentro Académico - Cultural Intersedes Palmira y Manizales*. Manizales.
- GONZÁLEZ SALCEDO, L. O. 2001. *Uso del bambú en el concreto reforzado* Palmira, Colombia, Universidad Nacional De Colombia.
- GRAM & HANS, E. 1988. Durability of natural fibres in concreto. Natural fibre reinforced cement and concrete. *Concrete technology and desingn*, 288.

- GUERRERO, V. H., GALEAS, S., DÁVILA, J. L., PONTÓN, P., ROSAS, N. M., SOTOMAYOR, V. & VALDIVIESO, C. 2011. Aplicaciones estructurales e industriales. *Nuevos materiales*.
- GUIMARÃES JUNIOR, M., MONTEIRO NOVACK, K., BOTARO, V. R. & PROTÁSIO, T. D. P. 2012. Caracterização de polpas de bambu modificadas quimicamente visando melhorias em suas interações interfaciais para aplicações em compósitos *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13, 89-102.
- HERRERA-FRANCO, P. J. & VALADEZ GONZÁLEZ, A. 2004. Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites. *Applied Science and Manufacturing*, 35, 339-345.
- HIDALGO LÓPEZ, O. 1974. *Bambú, su cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía*, Bogotá D. E.
- HIDALGO LÓPEZ, O. 1978. *Nuevas técnicas de construcción con bambú*, Bogotá, Colombia.
- HUI-SHENG SHI, L. 2009. Characteristics of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash–cement matrices and effect of mineral admixtures on composite system.
- HUYBERS, P. 1990. The use of forestry thinnings and bamboo for building structure. In: SOBRAL, H. S. (ed.) *Second International RILHM Symposium Proceedings*. Salvador Bahia, Brazil.
- IDICULA, M., BOUDENNE, A., UMADEVI, L., IBOS, L., CANDAU, Y. & THOMAS, S. 2006. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 66, 2719-2725.
- JACOB, M., THOMAS, S. & VARUGHESE, K. T. 2004. Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites. *Composites Science and Technology*, 64, 955-965.
- JANSSEN, J. J. A. 2005. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and building materials*.
- JUÁREZ ALVARADO, C. A. 2002. *Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (agave lecheguilla) como materiales para construcción en México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- JUÁREZ ALVARADO, C. A., RODRÍGUEZ LÓPEZ, P., RIVERA VILLARREAL, R. & RECHY DE VON ROTH, M. D. L. A. 2004. Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. *Ingenierías*, VII, 7-19.
- JUNG, D. 2007. *Cultivo de bactéria Bacillus magaterium para a producao do biopolímero poli (3-hidroxibutirato) e madelagem matematica do bioproceso*.
- KAEWKUK, S., SUTAPUN, W. & JARUKUMJORN, K. 2013. Effects of interfacial modification and fiber content on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 45, 544-549.

- KHALIL, H. P. S. A., BHAT, I. U. H., JAWAID, M., ZAIDON, A., HERMAWAN, D. & HADI, Y. S. 2012. *Materials and design*.
- KHARADE, A. Y. & KALE, D. D. 1998. Effect of lignin on phenolic novolak resins and moulding powder. *Eur. Polym. J.*, 34, 201-205.
- KRISHNAMURTHY, D. 1986. Use of bamboo as a substitute for steel in conventional reinforced concrete. *Joint Symposium RILEM/CIB/NCCL*. Baghdad, Iraq.
- KUMAR GUPTA, S. 2014. *A study on mechanical behavior of bamboo fiber based polymer composites.*, National Institute Of Technology.
- KUMAR, V., KUSHWAHA, P. K. & KUMAR, R. 2011. Impedance–spectroscopy analysis of oriented and mercerized bamboo fiber–reinforced epoxy composite. *J. Mater Sci.*, 46, 3445.
- LA MANTIA, F. P. & MORREALE, M. 2011. Green composites: A brief review. *Composites: Part A Applied Science and Manufacturing*, 42, 579-588.
- LEAL, A. F., NASCIMENTO, J. W. B. & BARBOSA, N. P. 2004. Telhas longas a base de argamassa de cimento Portland reforçadas com fibras de sisal. *Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Nao-Convencionais: Habitacoes e Infra-Estrutura de Interesse Social*. Sao Paulo, Brasil.
- LEE, A. W. C., BAI, X. & PERALTA, P. N. 1994. Selected physical and mechanical properties of giant timber bamboo grow in South Carolina. *Forest Products Journal*, 44, 40-46.
- LEWIS, G. & MIRIHAGALIA, P. 1979. A low-cost roofing material for developing countries. *Building and Environment*, 14, 131-134.
- LI, Y., HU, C. & YU, Y. 2008. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Composites*, 39, 570-578.
- LIMA JR, H. C., MESQUITA, L. P., FABROIL, G., WILLRICH, F. L. & CZARNIESKI, C. J. 2005. Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus*. I: análise experimental. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9.
- LIMA JR., H. C., DALCANAL, P. R., WILLRICH, F. L. & BARBOSA, N. P. 2000. Características mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus*: Análise teórica e experimental. In: BARBOSA, N. P., SWAMY, R. N. & LYNSDALE, C. (eds.) *Sustainable construction into the next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials*. João Pessoa: SNT.
- LIMA JR., H. C., XAVIER, A. C., BARBOSA, N. P. & TOLEDO FILHO, R. D. 1996. Aderência bambu-concreto. *Congresso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora*. Juiz de Fora.
- LIMA, P. R. L. 2004. *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- LIPANGILE, T. N. 1990. The use of timber and bamboo as water conduits and storage. In: SOBRAL, H. S. (ed.) *Second International RILHM Symposium Proceedings*. Salvador Bahia, Brazil.
- LIU, H., WU, Q., HAN, G., YAO, F., KOJIMA, Y. & SUZUKI, S. 2008. Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies. *Composites Part A*, 39, 1891-1900.
- LONDOÑO, X., CAMAYO, G., RIAÑO, N. & LÓPEZ, Y. 2002. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, 16, 18-31.
- LÓPEZ, O. H. 2003. *Bamboo the gift of the gods*, Bogotá, Colombia.
- LUCENA, M. P., SUAREZ, A. & ZAMUDIO, I. 2009. Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambu para aplicaciones aeronauticas *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S1, 1107-1114.
- LUNDQUIST, L., MARQUE, B., HAGSTRAND, P. O., LETERRIER, Y. & MANSON, J. A. E. 2003. Novel pulp fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 63, 137-152.
- LUYT, A. S. & MALUNKA, M. E. 2005. Composites of low-density polyethylene and short sisal fibres: the effect of wax addition and peroxide treatment on thermal properties. *Thermochimica Acta*, 426, 101-107.
- MACÍAS MESA, J. A., ARTOLA PIMENTEL, M. D. L. & HERNÁNDEZ RAMOS, P. J. 2009. *Utilización de fibras en hormigones. La experiencia cubana con empleo del fibrequén*.
- MAJEWSKI, T. & BŁĘDZKI, A. 2013. Desarrollo y aplicaciones actuales de los plásticos reforzados por fibras naturales *XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*. Pachuca, Hidalgo, México.
- MANNAN, K. M. & TALUKDER, M. A. I. 1997. Characterization of raw, delignified and bleached jute fibres by study of absorption of moisture and some mechanical properties. *Polymer*, 38, 2493-2500.
- MANSUR, M. A. & AZIZ, M. A. 1983. Study of bamboo-mesh reinforced cement composites. *Int. Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5, 165-171.
- MARTÍNEZ BARRERA, G. & BROSTOW, W. 2009. Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation. In: BARRERA DÍAZ, C. & MARTÍNEZ BARRERA, G. (eds.) *Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*. Research Signpost, Kerala India.
- MARTÍNEZ BARRERA, G., MARTÍNEZ LÓPEZ, M. & MARTÍNEZ CRUZ, E. 2013. Concreto polimérico reforzado con fibras de luffa. *Información Tecnológica*, 24, 67-74.

- MARTÍNEZ, E. 2008. *Prototipo de un sistema constructivo para viviendas de bajo costo a partir de pl'ástico reciclado*. Universidad de los Andes.
- MARTÍNEZ, L. M., LÓPEZ MANCHADO, M., VÁZQUEZ, A. & ARROYO, M. 2000. Efecto de distintos tipos de fibra corta en las propiedades mecánicas de las mezclas de polipropileno/polietileno. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*.
- MEHDI, A. 2011. Structural reinforcement of building materials using polymer concrete. *American Journal of Scientific Research*, 23, 135-143.
- MIJANGOS, C. & SERAFIN, J. 2007. *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*, España.
- MOHANTY, A. K., KHAN, M. A. & HINRICHSEN, G. 2000. Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics—polyester amide composites. *Applied Science and Manufacturing*, 31, 143-150.
- MOHEBBY, B., GHOTBIFAR, A. & KAZEMI-NAJAFI, S. 2011. Influence of Maleic Anhydride Polypropylene (MAPP) on Wettability of Polypropylene / Wood Flour / Glass Fiber Hybrid Composites. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13, 877-884.
- MORÁN, J. I., ALVAREZ, V. A., CYRAS, V. P. & VÁSQUEZ, A. 2008. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose*, 15, 149-159.
- MORENO, L. E., OSORIO, L. R. & TRUJILLO, E. E. 2006. Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de Guadua angustifolia. *Ingeniería y Desarrollo*, 20, 125-133.
- MORI, T., UMEMURA, K. & NORIMOTO, M. 2008. Manufacture of drift pins and boards made from bamboo fiber for timber structures. *Taylor & Francis Group, Modern Bamboo Structures*, 129-137.
- NAAMAN, A. E. 1985. Fiber reinforcement for concrete. *Concrete International: Design and Construction*, 7, 21-25.
- NABI SAHEB, D. & JOG, J. P. 1999. Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*, 18, 351-363.
- NUNES, A. R. S. 2005. *Construido com a natureza bambu: Uma alternativa de ecodesenvolvimento*. Universidade Federal de Sergipe.
- OKUBO, K., FUJII, T. & YAMAMOTO, Y. 2004. Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35, 377-383.
- OLLER, S. 2003. *Simulación numérica del comportamiento mecánico de los materiales compuestos*, Barcelona, España.
- OSORIO, L., TRUJILLO, E., VUURE, V. & VERPOEST, I. 2011. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of

- bamboo/ epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30, 396-408.
- OSORIO SARAZ, J. A., VARÓN ARISTIZABAL, F. & HERRERA MEJÍA, J. A. 2007. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar *Dyna*, 69-79.
- PARRY, J. P. M. 1979. Low-cost handmade roof sheets of fibre reinforced cement. *Appropriate Technology, London*, 5, 6-10.
- PEREIRA DA ROSA, R. 2002. *Análise teorica e experimental de colunas armado com bambu*. PUC Río.
- PEREIRA, M. A. R. & BERALDO, A. L. 2007. *Bambu de corpo e alma*, Bauru.
- PISTOR, V., DOS SANTOS SOARES, S. S. S., ORNAGHI JÚNIOR, H. L., FIORIO, R. & ZATTERA, A. J. 2012. Influence of glass and sisal fibers on the cure kinetics of unsaturated polyester resin. *Materials Research*, 15, 1-7.
- POTHAN, L. A., OOMMEN, Z. & THOMAS, S. 2003. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 63, 283-293.
- PULIDO GONZÁLEZ, H., HERNÁNDEZ, E., RABELERO VELASCO, M., SANJUAN RAYGOZA, R. J. & JASSO GASTINEL, C. F. 2014. Valoración mecanotérmica de una resina biodegradable como agente de acoplamiento de materiales compuestos celulosicos/polímero hidrofóbico. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16.
- RAHMAN, R., HUQUE, M., ISLAM, N. & HASAN, M. 2008. Improvement of physico-mechanical properties of jute fiber reinforced polypropylene composites by post-treatment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 1739-1747.
- RAO, K., MURALI, M. & RAO, K. M. 2007. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite Structures*, 77, 288-295.
- RAY, A. K., DAS, S. K., MONDAL, S. & RAMACHANDRARAO, P. 2004. Microstructural characterization of bamboo. *Journal of Materials Science*, 39, 1055-1060.
- RAY, D., SARKAR, B. K., DAS, S. & RANA, A. K. 2002. Dynamic mechanical and thermal analysis of vinylester-resin-matrix composites reinforced with untreated and alkali-treated jute fibres. *Composites Science and Technology*, 67, 911-917.
- RAY, D., SARKAR, B. K., RANA, A. K. & BOSE, N. R. 2001. The mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 119-127.
- REIS, J. M. L. & CARNEIRO, E. P. 2013. Effect of piassava lees in the fracture behavior of polymer mortars. *Composite Structures*, 95, 564-568.
- REYES, U. 2008. Concreto reforzado con fibra de bagazo de caña.

- RODRIGO VELANDIA, F. 2008. *Estimación de módulo de elasticidad en materiales compuestos de matriz polimérica y fibras naturales cortas*. Universidad de los Andes.
- ROWELL, R. M. 2008. Properties and performance of natural-fiber composites. *Materials*, 3-66.
- RYDHOLM, S. A. 1965. *Pulping processes*. Interscience publishers.
- SABANÉS HERNÁNDEZ, M. A. 2013. *Uso de no tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción* Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- SALAZAR CASTILLO, C. A. 2015. *Desarrollo de un material compuesto de fibras naturales de bambú para la utilización en viviendas de bajo costo*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- SALVADOR, M. D., AMIGÓ, V., NUEZ, A., SAHUQUILLO, O., LLORENS, R. & MARTÍ, F. 2007. Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas
- SANJUAN-RAYGOZA, R. J. & JASSO GASTINEL, C. F. 2009. Effect of waste agave fiber on the reinforcing of virgin or recycled polypropylene. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8, 319-327.
- SANTOS DELGADO, P. 2011. *O bambu como material eco-eficiente: caracterizacao e estudos exploratórios de aplicacoes*. Universidade Federal de Ouro Preto.
- SANTOS DELGADO, P., BRAGANÇA LANA, S. L., AYRESA, E., SANTIAGO PATRÍCIO, P. O. & LAMBERT ORÉFICEC, R. 2012. The potential of bamboo in the design of polymer composites. *Materials Research* 15, 1-6.
- SATTURWAR, P. M., FULZELE, S. V. & DORLE, A. K. 2003. Biodegradation and in vivo biocompatibility of rosin: A natural film-forming polymer. *AAPS Pharmaceutical Science Technology*, 4, 1-6.
- SATTURWAR, P. M., FULZELE, S. V., PANYAM, J., MANDAOGADE, P. M., MUNDHADA, D. R., GOGTE, B. B., LABHASETWAR, V. & DORLE, A. K. 2004. Evaluation of new rosin derivatives for pharmaceutical coating. *International Journal of Pharmaceutics*, 270, 27-36.
- SATYANARAYANA, K. G., SUKUMARAN, K., MUKHERJEE, P. S., PAVITHRAN, C. & PILLAI, S. G. K. 1990. Natural fiber-polymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 12, 117-136.
- SATYANARAYANA, K. G., SUKUMARAN, K., PILLAI, S. G. K. & ROHATGI, P. K. 1986. Fabrication and properties of natural fiber-reinforced polyester composites. *Composites*, 17, 329-333.
- SCHAFER, H. G. & BRUNSSSEN, G. W. 1990. Sisal-fibre reinforced lost formwork for floor slabs. In: SOBRAL, H. S. (ed.) *Second International RILEM Symposium Proceedings*. Salvador Bahia, Brazil.

- SEN, T. & REDDY, H. N. J. 2011. Applications of sisal, bamboo, coir and jute and natural composites in structural up gradation. *International J. Inovation, Management and Technology*, 2, 186.
- SHAH, S. P. 1990. Fiber reinforced concrete. *Concrete International, American Concrete Institute*, 12, 81-82.
- SINGH, D. S. S., SINGH, N. P. & DWIVEDI, V. N. 2007. Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement. *Ind J Eng Mater Sci*, 14, 69-76.
- SINGLETON, A. C. N., BAILLIE, C. A., BEAUMONT, P. W. R. & PEIJS, T. 2003. On the mechanical properties, deformation and fracture of a natural fibre/recycled polymer composite. *Composites Part B: Engineering*, 34, 519-526.
- SMITH, P. D. 1979. Bamboo Fibre as Reinforcing Material in Concrete. *Appropriate Technology, London*, 6, 8-10.
- SPENGLER, E. 2017. Fabricación ecológica de la fibra de bambú. *Bamboo Technology Network Europe*.
- SREEKALA, M. S., KUMARAN, M. G., JOSEPH, R. & THOMAS, S. 2001. Stressrelaxation behaviour in composites based on short oil-palm fibres and phenol formaldehyde resin. *Composites Science and Technology*, 61, 1175-1188.
- SREEKUMAR, P. A. 2008. Matrices for natural-fibre reinforced composites. . *Materials*, 2, 67-126.
- SUZUKI, T. & YAMAMOTO, T. 1990. Fire resistant materials made with vegetable plants and fibres and inorganic particles. In: SOBRAL, H. S. (ed.) *Second International RILEM Symposium Proceedings*. Salvador Bahia, Brazil.
- TAJVIDI, M., FALK, R. H. & HERMANSON, J. C. 2006. Effect of natural fibers on thermal and mechanical properties of natural fiber polypropylene composites studied by dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 4341-4349.
- TOLEDO FILHO, R. D., GHAVAMI, K., ENGLAND, G. L. & SCRIVENER, K. 2008. Develoment of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement & Concrete Composites*, 25, 185-169.
- TOLEDO FILHO, R. D., SILVA, F. A., FAIRBAIRN, E. M. & MELO FILHO, J. A. 2009. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, 23, 2409-2420.
- TORRES, F. G. & CUBILLAS, M. L. 2005. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene. *Polymer Testing*, 24, 694-698.
- TSERKI, V., ZAFEIROPOULOS, F. S. & PANAYIOTU, C. 2005. A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibers. *Composites Part A – Applied Science and manufacturing*, 36, 1110.

- VALAREZO JARAMILLO, L. E. 2013. *Obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de Guadua angustifolia provenientes del Ecuador*. Universidad Politécnica Salesiana.
- VALCUENDE, M., BENLLOCH, J. & PARRA, C. 2004. Estudio experimental de piezas lineales de hormigón reforzadas con fibras de carbono. *Inf. Tecnol.*, 16, 23-28.
- VARELA REYES, I. & CHAVIANO, D. 2013. El bambú: Recurso renovable y sostenible para el diseño y construcción. www.monografias.com [Online]. 2017].
- VÁZQUEZ, G., GONZÁLEZ, S., FREIRE, S. & ANTORRERA, G. 1997. Effect on chemical modification of lignin on the gluebond performance of lignin-phenolic resin. *Bioresour. Technol.* , 60, 191-198.
- VICTORINO, C. 2016. Los cables de bambú, historia y futuro como refuerzo del hormigón. *Huellas de arquitectura*.
- VILLAR, E. 2010. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters.