

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*)

LEONARDO MEDEIROS LIMA

MANAUS

2019

LEONARDO MEDEIROS LIMA

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Materiais Regionais e Não-Convencionais Aplicados à Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho.

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L732p Lima, Leonardo Medeiros
Produção e caracterização de compósitos cimentícios reforçados
com fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*) / Leonardo Medeiros
Lima. 2019
82 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João de Almeida Melo Filho
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Compósitos. 2. fibras de bambu. 3. *Bambusa vulgaris*. 4.
construção civil. I. Melo Filho, João de Almeida II. Universidade
Federal do Amazonas III. Título

LEONARDO MEDEIROS LIMA

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Materiais Regionais e Não-Convencionais Aplicados à Engenharia.

Aprovado em: ___ / ___ / _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho
Universidade Federal do Amazonas

Prof^a. Dr^a. Virginia Mansanares Giacon
Universidade Federal do Amazonas

Prof^a. Dr^a. Cristina Gomes da Silva
Universidade Federal do Amazonas

Aos meus pais, que sempre proporcionaram o suporte necessário para eu alcançar minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Ao professor João de Almeida, pela orientação e conhecimentos transmitidos.

Aos demais professores do PPGEC, em especial à prof^a. Virgínia Giacon e prof. Raimundo Vasconcelos pelo apoio e conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos de laboratório Diogo, Jorge, Nilson e Lucas, pela colaboração durante as atividades experimentais.

Às instituições de ensino e pesquisa pelo apoio laboratorial, Universidade Federal do Amazonas, Universidade Estadual do Amazonas, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e Universidade de São Paulo.

À chefia do meu trabalho, Carmem, Marisa e Celso, pela confiança e pelas horas liberadas para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos Joelma, Eduarda, Reginaldo e sua equipe pela ajuda prestada.

Ao meu companheiro, Paulo Caldas, pela paciência e pelo suporte emocional ao longo dessa jornada que foi o mestrado.

Ao meu pai, Álvaro Benedito, pela dedicação a nossa família e pelo suporte físico durante toda minha carreira acadêmica até aqui, sempre priorizando meus estudos.

A minha mãe, Maria Garcy, pelas conversas, pelos conselhos, pelo amor, por ser meu porto seguro e por sempre me incentivar a correr atrás dos meus sonhos.

A toda minha família pela torcida.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A construção civil necessita constantemente de inovações tecnológicas, com a finalidade de diminuir os impactos ambientais e aprimorar a eficiência energética dos processos construtivos, sempre visando a economia e, mais recentemente, a sustentabilidade. Nesse contexto, inserem-se as fibras de bambu na produção de compósitos, haja vista que detêm bons resultados nas propriedades mecânicas como a resistência à tração, chegando a ser comparadas ao aço, porém, mais leves, entre outras vantagens como rápido cultivo e grande disponibilidade, fatores importantes para o desenvolvimento sustentável. O objetivo do presente estudo é desenvolver e caracterizar compósitos cimentícios reforçados com fibras de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, facilmente encontrada nas regiões Norte e Nordeste do país. Com a finalidade de evitar a degradação das fibras no interior da argamassa, foram realizados tratamentos tanto na matriz, com a substituição de 50 % do cimento em massa pela pozolana metacaulim, que reduz a formação de Ca(OH)_2 , substância prejudicial às fibras; como o processo químico de mercerização nas próprias fibras, que se mostrou eficiente na concentração de 10 % de NaOH. A *Bambusa vulgaris* apresentou massa específica de $1,4 \text{ g/cm}^3$ e resistência à tração de 388 MPa, ótimas propriedades buscadas para reforço. Foram produzidas placas cimentícias com fibras longas e com fibras curtas de bambu, nos teores de 2, 4 e 6 % de fibra-cimento. Os compósitos com fibras curtas foram as que melhor aprimoraram suas características mecânicas com aumento de 42% na resistência à flexão com 2% de reforço, enquanto o reforço de 6% proporcionou uma majoração de 344% na tenacidade. As placas com fibras longas obtiveram as menores densidades, com redução de até 12%.

Palavras-chave: Compósitos, fibras de bambu, *Bambusa vulgaris*, construção civil.

ABSTRACT

Civil construction constantly needs technological innovations in order to reduce environmental impacts and improve the energy efficiency of construction processes, always aiming at the economy and, more recently, sustainability. In this context, bamboo fibers are inserted in the production of composites, since they have good results in mechanical properties such as tensile strength, being compared to steel, but lighter, among other advantages such as fast cultivation and large availability, important factors for sustainable development. The aim of this study is to develop and characterize bamboo fiber reinforced cementitious composites of *Bambusa vulgaris* species, easily found in the North and Northeast regions of the country. In order to avoid fiber degradation inside the mortar, treatments were performed on matrix, replacing 50% of the mass cement with pozzolan metacaulim, which reduces the formation of Ca(OH)_2 , a substance harmful to the fibers; also the chemical process of mercerization were performed in the fibers themselves, which was efficient in the concentration of 10% of NaOH. *Bambusa vulgaris* presented a specific mass of 1.4 g / cm^3 and tensile strength of 388 MPa, which are excellent reinforcement properties. Long and short fiber bamboo cementitious boards were produced, the last ones are the ones that best improved their mechanical characteristics with a 42% increase in flexural strength with 2% reinforcement, while the 6% reinforcement provided an increase of 344% in toughness. Long fiber composites obtained the lowest densities, with a reduction of 12%.

Keywords: Composites, bamboo fibers, *Bambusa vulgaris*, civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes disposições de reforços na matriz. a) aleatório e b) unilateral.....	17
Figura 2 – Diferentes tipos de rizomas.....	22
Figura 3 - Estrutura externa do bambu.....	22
Figura 4 – Distribuição geográfica original do bambu.....	23
Figura 5 – Floresta de bambu no sudoeste da Amazônia em 2004.....	24
Figura 6 – a) Bambuzal; b) entrenós e c) lâminas de bambu.....	24
Figura 7 – Fibras de <i>Bambusa vulgaris</i> pós tratamento.....	26
Figura 8 – Sistema de imunização do bambu.....	27
Figura 9 – Microestrutura da sessão do colmo.....	28
Figura 10 – Estrutura de uma fibra lignocelulósica.....	28
Figura 11 – a) Fibra de bambu e b) Lâmina de bambu.....	29
Figura 12 – a) Microestrutura superficial da fibra de bambu; b) Microestrutura da sessão da fibra de bambu.....	30
Figura 13 – Curvas de tensão vs. deformação de resistência à flexão em compósitos cimentícios reforçados com a) polpa celulósica de bambu e b) polpa e nanofibras de fibras (híbridos).....	33
Figura 14 – Digratograma de raio x do Metacaulim HP Ultra.....	35
Figura 15 – Curva granulométrica da areia.....	36
Figura 16 – Gráfico de dosagens do Glenium 51.....	37
Figura 17 – Touceira de bambu <i>Bambusa vulgaris</i>	38
Figura 18 – Cavacos de bambu.....	39
Figura 19 – Feixes de fibras longas.....	40
Figura 20 – Fibras curtas.....	40
Figura 21 – Fluxograma com o procedimento experimental adotado.....	42
Figura 22 - Esquema de suporte para fibra.....	45
Figura 23 – a) Equipamento AME-5kN e computador; b) Ensaio de resistência à tração direta da fibra de bambu.....	46
Figura 24 – Ensaio de mini abatimento: a) dimensões do cone e b) cone sobre a placa de vidro e papel milimetrado para realização do ensaio.....	47
Figura 25 – Ensaio de resistência à compressão.....	48
Figura 26 – a) Molde do CFL; e b) produção do CFL.....	50
Figura 27 – a) Molde do CFC e; b) produção do CFC.....	51

Figura 28 – Ensaio de flexão em 4 pontos.....	52
Figura 29 – a) fibras longas tratadas e b) fibras curtas tratadas.....	54
Figura 30 – MEV da fibra de bambu natural. Ampliação: a) 837x e b) 3.090x.....	55
Figura 31 – MEV da fibra de bambu tratada. Ampliação: a) 2.280x e b) 1.370x.....	55
Figura 32 – Curvas TG/dTG da Bambusa vulgaris.....	57
Figura 33 – Sessões dos feixes de fibras.....	60
Figura 34 – Gráfico do espalhamento pelo fator a/c e teor de superplastificante.....	61
Figura 35 – Fibras longas na superfície da placa com matriz de fator a/c 0,45 e 2% de teor de superplastificante.....	62
Figura 36 – Compósitos produzidos.....	63
Figura 37 – Análise das diferenças das propriedades físicas entre os tipos de compósitos.....	65
Figura 38 – Análise das diferenças das propriedades mecânicas entre os tipos de compósitos.....	67
Figura 39 – Curvas típicas tensão de flexão x deformação dos compósitos com fibras curtas.....	68
Figura 40 – Curvas típicas tensão de flexão x deformação dos compósitos com fibras longas.....	68
Figura 41 – MEV do CFC. Ampliação: 8.330x.....	69
Figura 42 – MEV do CFL. Ampliação: a) 167x e b) 830x.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre resistência a tração e massa específica.....	20
Tabela 2 – Resistências das partes do bambu <i>Guadua angustifolia</i> (MPa).....	21
Tabela 3 – Análise química da <i>Bambusa vulgaris</i>	25
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da <i>Bambusa vulgaris</i> (MPa).....	25
Tabela 5 – Caracterização das fibras de bambu.....	30
Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento Portland CP I-S.....	34
Tabela 7 – Propriedades químicas do cimento Portland CP II-Z 32 [%].....	34
Tabela 8 – Composição química do Metacaulim HP Ultra (%).....	35
Tabela 9 – Caracterização físico-química do Glenium 51.....	36
Tabela 10 – Caracterização físico-química da água.....	37
Tabela 11 – Ensaio de mini abatimento.....	47
Tabela 12 - Delineamento experimental dos compósitos.....	49
Tabela 13 – Composição dos compósitos [g].....	49
Tabela 14 – Composição química da <i>Bambusa vulgaris</i> [%].....	56
Tabela 15 – Temperaturas dos eventos térmicos referentes à Figura 32.....	58
Tabela 16 – Caracterização física da <i>Bambusa vulgaris</i>	59
Tabela 17 – Caracterização mecânica da fibra da <i>Bambusa vulgaris</i>	60
Tabela 18 – Matrizes dos compósitos.....	62
Tabela 19 – Resistência à compressão das matrizes.....	63
Tabela 20 – Caracterização física dos compósitos.....	64
Tabela 21 – Caracterização mecânica dos compósitos.....	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 MATRIZ CIMENTÍCIA.....	14
2.1.1 Materiais pozolânicos.....	15
2.2 REFORÇO COM FIBRAS VEGETAIS.....	16
2.2.1 Desvantagens das fibras vegetais.....	17
2.2.2 Tratamentos.....	18
2.3 BAMBU.....	19
2.3.1 O bambu e a construção civil.....	19
2.3.2 A planta.....	21
2.3.2.1 Bambusa vulgaris.....	24
2.3.3 O cultivo do bambu.....	26
2.3.4 Imunização do bambu.....	27
2.3.5 Fibras de bambu.....	27
2.3.5.1 Extração das fibras de bambu.....	30
2.4 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU.....	31
3 MATERIAIS.....	34
3.1 CIMENTO PORTLAND.....	34
3.2 METACALIM.....	34
3.3 AREIA.....	36
3.4 SUPERPLASTIFICANTE.....	36
3.5 ÁGUA.....	37
3.6 FIBRAS DE BAMBU.....	38
3.6.1 Coleta.....	38
3.6.2 Extração das fibras longas e curtas.....	39
3.6.3 Imunização.....	41
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	42
4.1 TRATAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU.....	43
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BAMBU.....	43
4.2.1 Determinação do máximo teor de umidade.....	43
4.2.2 Determinação da massa específica.....	44
4.2.3 Análise termogravimétrica (TG/dTG).....	44
4.2.4 Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX).....	44

4.2.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	44
4.2.6	Resistência à tração direta	45
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA	46
4.3.1	Reologia	47
4.3.2	Resistência à compressão	48
4.4	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS	48
4.4.1	Compósitos com fibras longas	49
4.4.2	Compósitos com fibras curtas	50
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	51
4.5.1	Caracterização física dos compósitos.....	51
4.5.1.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	52
4.5.2	Resistência à flexão.....	52
4.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	TRATAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU	54
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BAMBU	54
4.2.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	54
4.2.2	Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX)	56
4.2.3	Análise termogravimétrica (TG/dTG)	57
4.2.4	Umidade e massa específica.....	59
4.2.5	Resistência à tração direta	59
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA	61
4.3.1	Reologia	61
4.3.2	Resistência à compressão	63
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	63
4.4.1	Caracterização física dos compósitos.....	64
4.4.2	Caracterização mecânica dos compósitos	66
4.4.3	Microscopia eletrônica de varredura – MEV	69
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil vem crescendo significativamente nos últimos anos, principalmente devido à busca por melhor qualidade de vida, programas habitacionais, mobilidade urbana e eventos socioeconômicos mundiais. A necessidade por materiais que atendam o crescimento desse segmento tem impulsionado o desenvolvimento de novos produtos que sejam competitivos e apresentem bom desempenho, além de serem sustentáveis, pois, os produtos da construção civil industrializados ou convencionais mobilizam vastos recursos financeiros, consomem muita energia de trabalho e requerem um processo centralizado (OVIEDO, 2013). Viera et al. (2016) defende que o desenvolvimento e a aplicação de materiais de baixo custo e reduzido consumo de energia na engenharia civil tornam-se sustentavelmente viáveis.

Diante desse cenário, surge a necessidade de desenvolver novos materiais que possam ser alternativos e que tenham um desempenho igual ou superior aos materiais tradicionais. Os compósitos são exemplos desses novos produtos. Formados por no mínimo dois materiais diferentes combinados em uma unidade organizacional macroscópica, onde sua estrutura é constituída por uma fase matriz e outra fase dispersa denominada reforço. A matriz de um composto pode ter origem polimérica, metálica ou cerâmica e sua principal função é manter a estrutura do conjunto organizada. Sobre o desempenho mecânico, a matriz absorve as solicitações dos carregamentos e transmite os mesmos aos reforços, desenvolvendo assim uma resistência de forma associada (FERREIRA et al., 2017).

Segundo Sanal e Verma (2017), os compósitos desenvolvidos têm propriedades superiores em relação às suas partes constituintes. As propriedades finais de um compósito reforçado dependem de basicamente três fatores: das propriedades dos componentes individuais, da concentração de reforço e, principalmente, da interação interfacial entre a matriz e o reforço (QUININO, 2015).

De acordo com Lima (2016), os compósitos podem ser divididos em sintéticos e naturais. Os compósitos naturais ocorrem espontaneamente na natureza e podem ser encontrados no meio ambiente, como por exemplo a madeira, que possui uma matriz polimérica reforçada com fibras de celulose e hemicelulose. Já os compósitos sintéticos são fabricados por processos tecnológicos desenvolvidos pelo homem.

O desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras naturais alia as propriedades mecânicas desejadas à questão ambiental, social e econômica (FERREIRA et al., 2017). Dessa forma, há um interesse crescente na utilização das fibras vegetais que parte principalmente da preocupação ecológica com a substituição de materiais sintéticos provenientes de origem fóssil por fontes naturais e de seu baixo custo (LIMA, 2016).

1.1 OBJETIVO GERAL

- Produzir e caracterizar física e mecanicamente compósitos cimentícios reforçados com fibras do bambu *Bambusa vulgaris*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física e mecanicamente as fibras do bambu *Bambusa vulgaris*;
- Tratar as fibras de bambu para melhor compatibilização superficial fibra-matriz;
- Desenvolver compósitos cimentícios reforçados com fibras longas (CFL) e fibras curtas (CFC) do bambu *Bambusa vulgaris*;
- Caracterizar física e mecanicamente o CFL e o CFC;
- Verificar a compatibilização superficial entre as fases matriz e reforço dos compósitos produzidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATRIZ CIMENTÍCIA

O cimento Portland é um material pulverulento, composto de silicatos e aluminatos de cálcio com inúmeras propriedades e características, que quando misturados com água, hidratam-se e formam uma pasta ligante, permanecendo maleável por cerca de 1,5 hora. Em seguida, endurecem e desenvolvem elevada resistência mecânica ao longo do tempo (SILVA et al., 2018). É uma das principais matérias-primas utilizadas em matrizes de compósitos, devido a sua excelente versatilidade, podendo atender a demanda específica relativa ao meio ambiente ao qual estará sujeito, configuração arquitetônica projetada, aos requisitos de durabilidade, técnicos e de sustentabilidade (OVIDO, 2013). Entretanto, produtos à base de cimento podem apresentar fissuras quando submetidos à tensão, o que ocasiona rápida propagação, reduzindo a resistência mecânica do material. Dessa forma, através da introdução de fibras como reforço, observa-se uma melhora no desempenho de argamassas, uma vez que pode obstruir a propagação de microfissuras, retardando seu início e aumentando a resistência.

Os compósitos de fibrocimento apresentam maior ductilidade, capacidade de flexão e resistência à fratura quando comparados a materiais não fibro-reforçados. Tais compósitos possuem grande potencial para uso na fabricação de produtos finos tais como placas planas e corrugadas para elemento de cobertura, divisórias, revestimentos externos, para uso na indústria de construção de baixo custo, construções residenciais, instalações rurais e galpões. (MELO FILHO, 2012).

De acordo com Quinino (2015), a eficiência da inserção de filamentos em matrizes cimentícias varia conforme a distribuição uniforme das fibras na pasta de cimento, o fator de forma e o teor ótimo de adição das mesmas. Quando tais parâmetros são atendidos, os compósitos são mais deformáveis, detêm maior tenacidade e, portanto, maior módulo de elasticidade (CHRIST, 2014).

Estudos têm sido realizados no Brasil para aplicar fibras naturais em matrizes cimentícias. As fibras de coco, sisal, bagaço da cana de açúcar e bambu são as mais pesquisadas como elementos de reforço (SILVA, ALVIM e DOMINGUEZ, 2016). Tais materiais são um expoente no quesito da substituição de materiais de engenharia convencionais por materiais naturais renováveis, devido ao fato de sua matéria prima vegetal ser normalmente considerada lixo ou de fácil produção (LIMA et al., 2016).

Melo Filho (2012) relata que fibras naturais inseridas em meio alcalino como de matrizes cimentícias (presença de hidróxido de cálcio), estão sujeitas à degradação por mineralização e reduz sua resistência à tração, bem como a do compósito. Uma forma para reduzir tal degradação é a utilização de cimento a base de óxido de magnésio (MgO), cujo ph é inferior ao cimento Portland (SALES, 2018). Outra opção é a adição de materiais pozolânicos na matriz, cujas vantagens são explicadas a seguir.

2.1.1 Materiais pozolânicos

A ASTM C593 (2011) define as pozolanas como materiais siliciosos ou sílico-aluminosos com pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando finamente moídos e em contato com umidade e temperatura ambiente, reagem quimicamente com álcalis e hidróxidos alcalino-terrosos formando ou ajudando a formar compostos com propriedades cimentícias. A reação entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, produzido ao longo da hidratação do cimento, forma silicatos de cálcio hidratado (CSH), que desenvolvem resistência mecânica, além de não degradarem as fibras naturais (DAL MOLIN, 2011; CORREIA et al, 2018).

Segundo Czarnecki e Day (2010) os materiais pozolânicos maximizam as propriedades da matriz, reduzem a temperatura máxima durante a hidratação, bem como a permeabilidade à água e a penetração de íons químicos, melhorando o acabamento. Eles podem ser: a) industrializados, como por exemplo, a escória de alto-forno, sílica ativa e cinzas volantes; b) naturais, como argilas vermelhas; e c) calcinadas, como a metacaulinita. Estas últimas são produzidas pela calcinação de terras siliciosas naturais ou sílico-aluminosas, tal calcinação é realizada com a finalidade de ativação das propriedades pozolânicas (ASTM C593, 2011).

A produção de metacaulinita ou metacaulim, pozolana utilizada neste trabalho, é realizada através da calcinação do caulim, um minério composto de silicatos hidratados de alumínio e está entre os seis minerais mais importantes e abundantes da crosta terrestre. Este minério é formado basicamente por caulinita, um argilo-mineral produzido pela decomposição do feldspato, e apresenta coloração branca ou esbranquiçada, devido ao baixo teor de ferro (LUZ et al., 2005). A calcinação é praticada submetendo o caulim a altas temperaturas, entre 600 a 900 °C, por cerca de duas horas. Segundo Medina (2011), em temperaturas maiores que 900°C o metacaulim tende a cristalizar novamente, apresentando pouca atividade pozolânica.

Buscando garantir a durabilidade dos compósitos, eliminando a degradação das fibras naturais, Melo Filho (2012) concluiu que a substituição de 50 %, em massa, de cimento Portland por metacaulinita foi suficiente para o consumo total do hidróxido de cálcio presente na matriz. Weber (2018) afirma que a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim acarreta em aumento da resistência à compressão, reduz o pH e ainda a permeabilidade das matrizes.

2.2 REFORÇO COM FIBRAS VEGETAIS

Sanal e Verma (2017) explicam que as fibras naturais em simples definição são fibras extraídas de plantas (vegetais, folhas e madeira), de animais e de processos geológicos. Independentemente de sua origem, as fibras vegetais são compostas por celulose, hemicelulose e lignina, e a organização estrutural desses componentes, bem como o nível de microfibrilas presentes interferem diretamente nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos (POSADA et al, 2016).

Motivações para utilização dessas fibras como reforço em compósitos incluem a diminuição dos custos de matérias-primas e uma potencial contribuição para a redução dos impactos ambientais, visto que elas são renováveis e exigem menor quantidade de energia em sua produção, o que colabora com o desenvolvimento sustentável. Além disso, fibras vegetais podem ser produzidas localmente, gerando benefícios socioeconômicos locais (VIERIA et al, 2016).

Vieria et al. (2016) também relata que o Brasil possui inúmeros recursos naturais que apresentam potenciais como elementos construtivos alternativos, e de acordo com Correia (2015), foram produzidos 1,3 milhões de toneladas de fibras naturais no Brasil em 2010. Uma grande variedade de fibras existente na região amazônica podem ser empregadas como reforços em compósitos de engenharia e de outros setores da indústria mundial, como naval, aeronáutica e automotiva (COSTA et al., 2007).

As fibras vegetais são ótimas alternativas para inserção em matrizes cimentícias, pois, possuem propriedades mecânicas moderadas, como tensão máxima na ruptura e módulo de elasticidade, além de sua baixa densidade, podendo substituir a altura outros materiais, como o aço, polipropileno, vidro, nylon e outros polímeros. (MAZZOLI, 2015; EHRENBRING E TUTIKIAN, 2016).

O desempenho mecânico de compósitos reforçados com fibras vegetais é aprimorado quando estas estão dispersas uniformemente, devido à melhor distribuição

das tensões, maior resistência à fissuração, ao impacto, aumento da resistência à flexão, da capacidade de suportar carregamento pós-fissuração, maior ductilidade e tenacidade (VIERIA et al, 2016). Outros fatores que influenciam as propriedades mecânicas são quantidade, volume relativo e comprimento das fibras (WEBER, 2018). De acordo com Jaballi, Miraoui e Hassis (2016), compósitos com fibras longas dispostas em uma única direção resulta em características mecânicas superiores aos compostos com fibras dispostas aleatoriamente. A Figura 1 apresenta exemplos de compósitos com reforços em diferentes disposições.

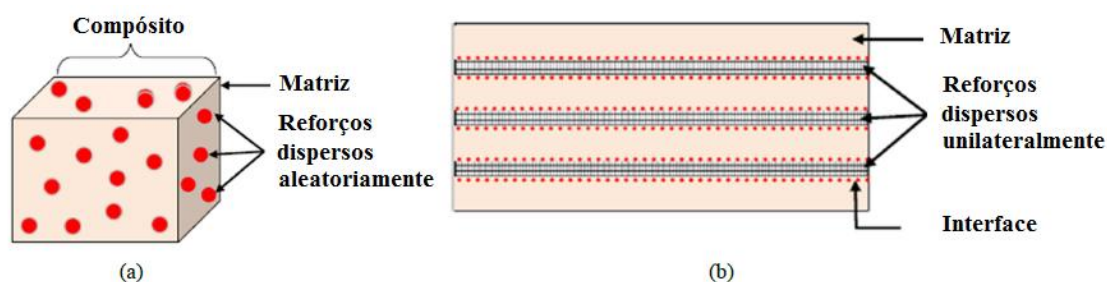


Figura 1 – Diferentes disposições de reforços na matriz. (a) aleatório e (b) unilateral.
Fonte: (ASHIK e SHARMA, 2015)

As fibras vegetais apresentam outras características vantajosas como o baixo custo (atualmente um terço do custo da fibra de vidro, por exemplo), são atóxicas e não abrasivas, possuem boas propriedades térmicas e alto módulo específico, podendo conferir aos compósitos melhores propriedades de isolamento térmico e acústico (FERREIRA et al., 2017).

2.2.1 Desvantagens das fibras vegetais

As fibras vegetais podem apresentar grandes variabilidades em suas propriedades por serem originadas sem controle tecnológico (EHRENBRING & TUTIKIAN, 2016). A heterogeneidade das fibras em relação à produção deve ser observada com cautela, visto que as condições climáticas, de plantio e solo são fatores determinantes no desenvolvimento da planta, onde o controle eficiente das condições naturais de desenvolvimento é imprescindível (MANALO, 2015). O sisal, por exemplo, chega a possuir valores de resistência à tração que variam em até 500 % e o diâmetro médio de suas fibras varia entre 10 e 30 μm (LIMA, 2016). Todavia, Lima et al. (2016) provaram através de seu estudo que é possível modelar estas propriedades utilizando

distribuições estatísticas e simulação de Monte Carlo. Em seu trabalho, foi utilizada a distribuição estatística de Weibull, pois a mesma é utilizada para modelar o comportamento mecânico em materiais notoriamente frágeis, e devido a mesma se basear no conceito em que um sistema físico irá falhar em seu elo mais fraco.

Há uma outra problemática no que se refere a origem das fibras naturais quando as mesmas são provenientes de exploração não racional e a ausência de elucidação de suas características básicas (FERREIRA et al., 2017).

Outros fatores que restringem o uso de fibras vegetais como agentes de reforço é a dificuldade em se obter fibras longas e também o caráter hidrofílico das mesmas, ou seja, sua alta capacidade de absorver água limita sua utilização em ambientes úmidos, pois a absorção de moléculas de água compromete sua integridade estrutural e é altamente indesejada em aplicações de engenharia (LIMA et al, 2016).

A durabilidade das fibras vegetais ainda é um fator questionável, devendo haver mais pesquisas para que seja estabelecida. O hidróxido de cálcio disperso na matriz cimentícia agride diretamente a integridade da lignina e da hemicelulose, componentes presentes na lamela central das fibras que garantem a ligação das células individuais, desestabilizando a microestrutura do material, além da hidrólise alcalina degradar as moléculas de celulose das fibras reduzindo sua resistência à tração (TOLEDO et al., 2000; GRAM, 1988).

Tem-se desenvolvido tratamentos para reduzir essas desvantagens na utilização das fibras vegetais em compósitos, alguns deles são explicados a seguir.

2.2.2 Tratamentos

Para diminuir o ataque às fibras vegetais pelos álcalis do cimento Portland e pelo hidróxido de cálcio originário da hidratação dos silicatos, têm sido sugeridos modificações na matriz pela inclusão de materiais pozolânicos, explicados no item 2.1.1.

Outro tipo de tratamento pode ser realizado, buscando melhor compatibilidade entre as fibras naturais e a matriz cimentícia, como o processo de mercerização, método utilizado nesta pesquisa. Consiste em um tratamento químico em meio alcalino, que modifica a fibra natural quimicamente, com remoção parcial da hemicelulose e lignina, através de uma hidrólise básica, utilizando-se hidróxido de sódio (NaOH) como agente modificador, resultando em diversos fatores positivos: remoção de materiais amorfos; superfície externa limpa e áspera (maior rugosidade), o que melhora

a aderência com a matriz; as fibrilas obtêm a capacidade de se rearranjar ao longo da direção longitudinal, aumentando sua resistência à tração (GASSAN, 2002; ACHOUR, GHOMARI e BELAYACHI, 2017; WEBER, 2018).

A imersão em solução de peróxido de hidrogénio combinado com ácido acético glacial também elimina parcialmente lignina e hemicelulose (YANG et al, 2017).

Sobre o carácter hidrofílico das fibras, existem tratamentos com plasma e a hornificação, que consiste em alteração na estrutura química superficial das fibras para que se tornem menos hidrófilas, promovida por ciclos de molhagem e secagem (AGUIAR, 2016).

Tratamentos físico-químicos têm sido amplamente investigados para controlar os constituintes, a microestrutura e o desempenho mecânico das fibras naturais, entretanto, ainda são limitados.

2.3 BAMBU

2.3.1 O bambu e a construção civil

Vieria (2016) defende que o bambu é uma alternativa viável para a construção civil, sendo um material natural considerado leve, resistente, versátil, com adequadas características físicas e mecânicas. Segundo Shah et al. (2016), além dessas qualidades, o bambu também apresenta baixa condutividade térmica.

Dentre as várias vantagens do uso do bambu, Oliveira (2013) cita algumas qualidades como matéria-prima para a construção civil, tais como:

- Baixa energia de produção se comparada a outros materiais como o aço, concreto e madeira, o que minimiza custos;
- Boa produtividade;
- Baixa massa específica;
- Forma tubular acabada;
- Resistência mecânica compatível com os esforços solicitantes a que estariam submetidas em estruturas adequadamente dimensionadas; e
- Vida útil dentro das expectativas normais dos materiais convencionais, relativo às condições ambientais onde é utilizado, seja ao ar livre ou envolvido por outros materiais.

Nos últimos anos, o bambu tem sido utilizado para aplicações mais tecnológicas, como painéis, compensados e também materiais compósitos, além de

aplicações estruturais (Depuydt et al., 2017). Penellum et al. (2018), afirma que um novo campo de pesquisa no desenvolvimento das aplicações estruturais do bambu tem o potencial de mudar a maneira como os edifícios e obras de infraestrutura são construídos. Os chineses há muito tempo aproveitam a resistência do bambu em estruturas, andaimes e ainda em substituição ao ferro como reforço do concreto (PEIXOTO, 2008). A Tabela 1 apresenta uma comparação da relação (R) de resistência à tração (σ) e massa específica (W) do bambu e outros materiais utilizados na engenharia.

Tabela 1. Relação entre resistência à tração e massa específica

Material	σ (MPa)	W (g/cm³)	$R = \frac{\sigma}{W} \cdot 10^{-2}$	$\frac{R}{R_{aço}}$
Aço (CA 50A)	500	7,83	0,64	1,00
Bambu	140	0,80	1,75	2,73
Bronze	703	8,86	0,79	1,24
Ferro forjado	423	7,70	0,55	0,83
Latão	400	7,51	0,53	0,83
Alumínio	304	2,79	1,09	1,70
Ferro Fundido	281	7,20	0,39	0,62

Fonte: PEIXOTO, 2008

É possível observar que o bambu apresenta valores satisfatórios aos esforços solicitantes à tração relacionados a baixa massa específica, que em comparação ao aço, esta relação chega a ser 2,73 vezes superior, constatando a sua viabilidade estrutural.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistências mecânicas realizados por Ghavami e Marinho (2005) referentes à espécie de bambu *Guadua angustifolia*, onde é observa-se que as partes sem nós possuem resistências superiores às partes com nós na maioria dos resultados.

Tabela 2. Resistências das partes do bambu *Guadua angustifolia* (MPa)

Partes	Nós	Resistência a Tração	Resistência a Compressão	Resistência ao Cisalhamento
---------------	------------	---------------------------------	-------------------------------------	--

Base	Sem	93,38	28,36	2,20
	Com	69,88	25,27	1,67
Centro	Sem	95,80	31,77	2,27
	Com	82,62	28,36	1,43
Topo	Sem	115,84	25,27	2,42
	Com	64,26	31,77	2,11
Médias		86,96	29,48	2,02

Fonte: GHAVAMI e MARINHO, 2005

A utilização do bambu como material construtivo é amplamente difundido em alguns países latino-americanos como no Equador, na Costa Rica e na Colômbia, mas principalmente em países asiáticos como China e Índia, que são os maiores produtores e detentores de uma tradição milenar e vasta bibliografia na área. No Brasil, seu uso ainda é restrito a pequenas iniciativas isoladas, apesar de sua adoção ser ideal para o desenvolvimento, principalmente por atingir comunidades que não têm acesso a muitos dos materiais convencionais disponíveis no mercado (PEIXOTO, 2008; LIMA; 2016).

2.3.2 A planta

O bambu é um vegetal pertencente à família das gramíneas (Poaceae), subfamília bambusoideae, formado basicamente por colmos, folhas e ramificações subterrâneas (VIERIA et al., 2016).

A estrutura externa do bambu é formada pelos sistemas subterrâneo de rizomas, podendo ser de até três tipos diferentes, mostrados na Figura 2; colmos, galhos e folha, pode apresentar flores ou frutos por vez, ou dois, simultaneamente. Os colmos são formados por uma série alternada de nós e entrenós, como mostrado na Figura 3, são fibras, vasos e condutores de seiva, que estão desuniformemente distribuídos na seção transversal. Esses colmos diferem, segundo a espécie, em comprimento, espessura da parede, diâmetro, espaçamento dos nós e resistência. Em sua maioria são ocos, podendo-se encontrar algumas espécies com entrenós sólidos e outros com água no seu interior. Os bambus têm diminuição gradual, no sentido da base para o topo, no diâmetro do colmo, na espessura da parede e no comprimento intermodal (GHAVAMI e MARINHO, 2005).

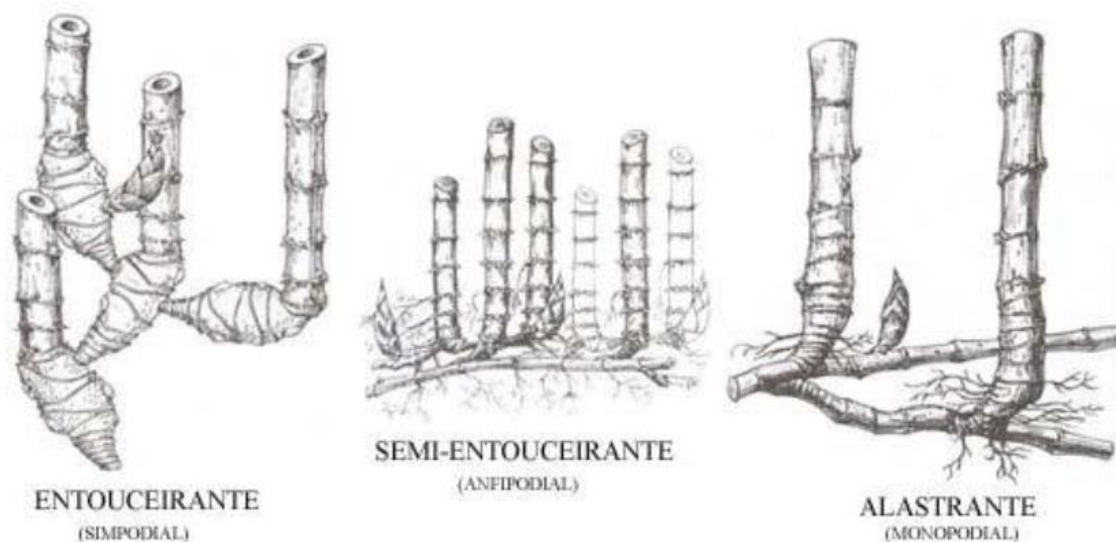


Figura 2 – Diferentes tipos de rizomas.
Fonte: LOBO, 2017.

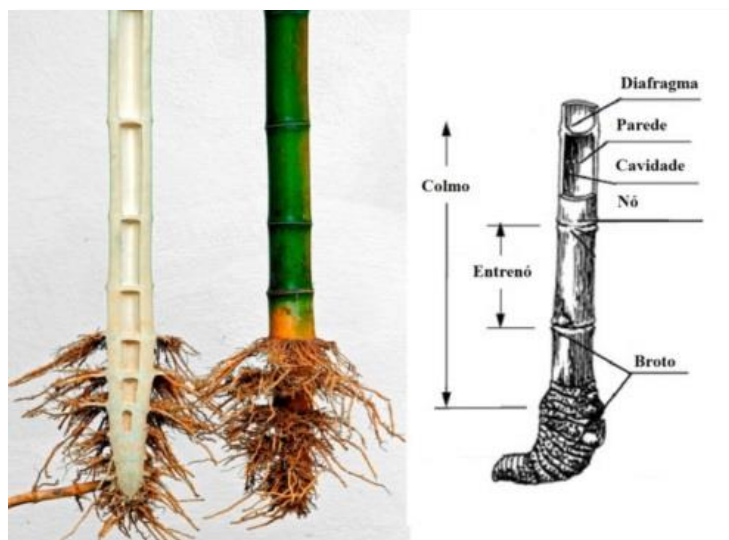


Figura 3 - Estrutura externa do bambu.
Fonte: LIMA, 2016

A espessura das paredes do colmo é muito variável, dependendo da espécie, pode apresentar o diâmetro interno tão reduzido que torna o bambu praticamente sólido. Tal espessura também depende da posição ao longo do colmo, quanto mais alto, mais fina vai se tornando. As paredes são constituídas por fibras de poucos milímetros, feitas de lignina e silício, alinhadas paralelamente (VIERIA et al., 2016).

Sobre o ciclo de vida dos bambus, Dunkelberg (1985) explica que os bambus morrem pouco tempo depois da floração e da produção de frutos, pois nesse processo os rizomas ficam exaustos pela energia despendida e morrem. Em muitas espécies, o seu

ciclo de vida é determinado pelo período de floração, que pode ser maior do que cem anos, embora algumas espécies continuem a florescer sem morrer.

Os bambus são encontrados em todos os continentes, exceto na Europa, em diferentes altitudes e latitudes, onde os climas são tropicais, subtropicais e temperados (PEIXOTO, 2008). A Figura 4 apresenta a distribuição geográfica original do bambu. Existem aproximadamente 70 gêneros e 1.200 espécies de bambu distribuídas entre os continentes, onde 67 % estão na Ásia e Oceania, 3 % na África e de 30 % nas Américas (LÓPEZ, 2003). No Brasil, as espécies mais comuns, entre os bambus exóticos são a *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), espécie em análise neste trabalho, *Bambusa tuldoides* (bambu comum), *Dendrocalamus asper*, *Dendrocalamus giganteus* (bambu-gigante ou bambu balde) e algumas espécies de *Phyllostachys*, conhecido vulgarmente por bambu-chinês ou japonês. Todas as espécies são originárias da Ásia e foram trazidas para o Brasil pelos imigrantes asiáticos e portugueses, onde se adequaram bem ao país, expandindo-se facilmente. Peixoto (2008) destaca dados sobre endemismo e distribuição

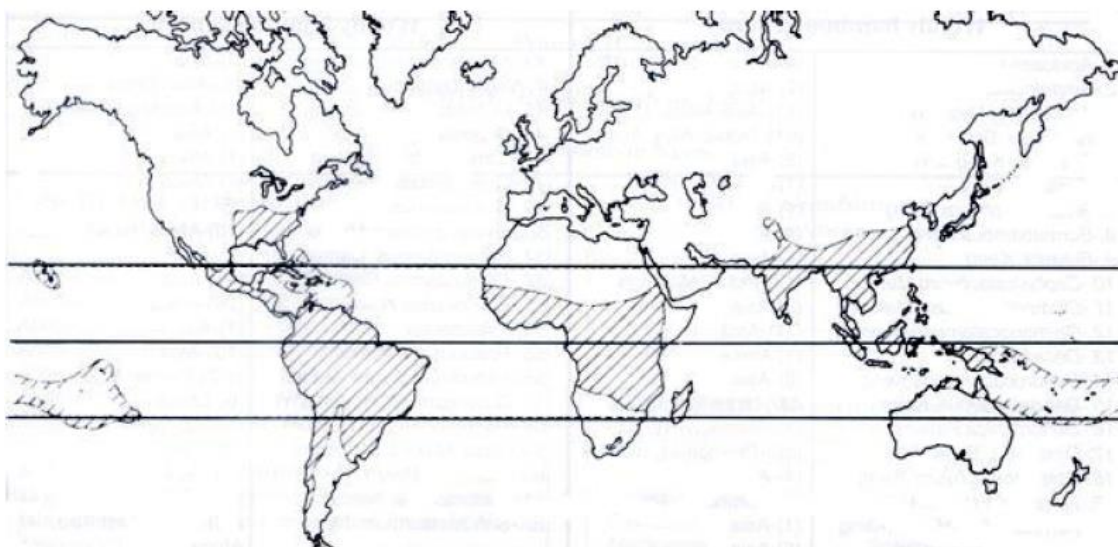


Figura 4 – Distribuição geográfica original do bambu
Fonte: PEIXOTO, 2008

geográfica das espécies por grandes biomas como o da Mata Atlântica (65%), Amazônia (26%) e Cerrado (9%). A Figura 5 apresenta o mapa de uma floresta de bambu na região sudoeste da Amazônia, compreendendo territórios do Brasil, do Peru e da Bolívia, com uma extensão calculada de 161.000 km², descontando áreas desmatadas em 2004.

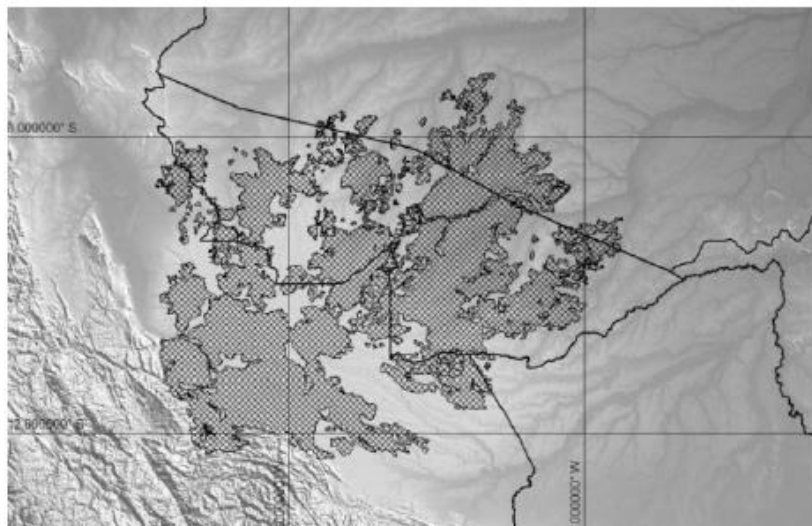


Figura 5 – Floresta de bambu no sudoeste da Amazônia em 2004.
Fonte: PEIXOTO, 2008

2.3.2.1 *Bambusa vulgaris*

A espécie de bambu analisada neste trabalho, como já citado, é a *Bambusa vulgaris*, espécie entouceirante inserida no Brasil que é bastante comum na região Nordeste, mas também na Região Norte. Esta espécie, quando na idade adulta, pode atingir entre 8 e 20 m de altura, e seu diâmetro externo entre 5 e 10 cm (WAHAB et al., 2012). A Figura 6 apresenta alguns aspectos dessa espécie.

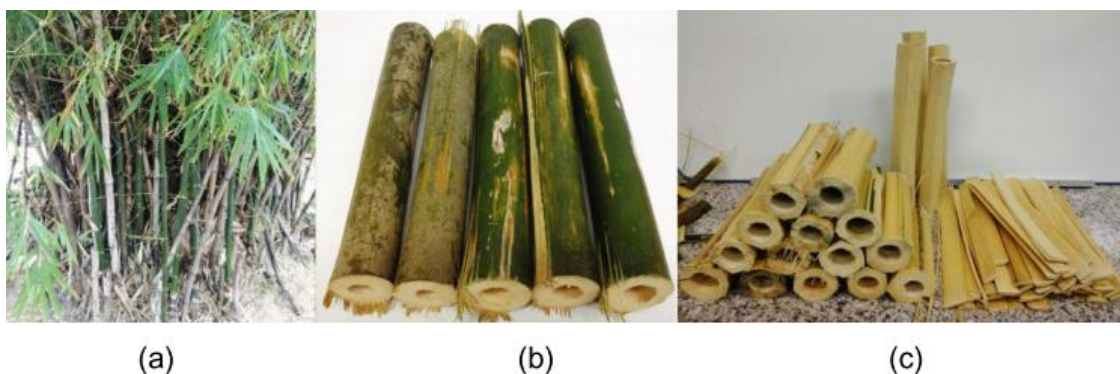


Figura 6 – a) Bambuzal, b) entrenós e c) lâminas de bambu ou cavacos
Fonte: LIMA, 2016

A grande vantagem da espécie *Bambusa vulgaris* é a orientação fibrilar uniforme ao longo da seção longitudinal do colmo. A idade dos bambus dessa espécie pode ser prevista com base na coloração amarelo/esverdeada observada na casca no momento da coleta, que indica a chegada à idade adulta (LIMA et al, 2016).

A Tabela 3 a seguir apresenta a análise química da *Bambusa vulgaris*, e na Tabela 4, suas propriedades mecânicas, com elevadas resistências, principalmente à tração e à flexão.

Tabela 3 – Análise química da *Bambusa vulgaris*

Determinações	Porcentagem (%)
Celulose	49,2
Lignina	14,5
Pentosanas	22,3
Solubilidade em soda a 1%	33,4
Solubilidade em água quente	15,0
Solubilidade em álcool-benzeno	5,2
Cinzas	1,8

Fonte: SOUZA, 2014

Tabela 4. Propriedades mecânicas da *Bambusa vulgaris*

Solicitação	Resistência (Mpa)
Tração	140,6
Compressão	52,67
Flexão	141,33
Cisalhamento	41,14

Fonte: GHAVAMI, 1990

Em seu trabalho, Lima (2016) extraiu bambus da espécie *Bambusa vulgaris*, presentes em touceiras da Universidade Federal do Ceará, com o diâmetro interno dos colmos sendo por volta de 5 cm e seu diâmetro externo, cerca de 9 cm, em média. Em seguida, extraiu as fibras mostradas na Figura 7 a seguir, após tratamento de mercerização e acetilação:



Figura 7 – Fibras de *Bambusa vulgaris* pós tratamento
Fonte: Lima, 2016

2.3.3 O cultivo do bambu

O bambu é uma planta perene, possui rápido crescimento sem a necessidade de replantio, atingem a idade adulta entre 3 e 4 anos e podem suportar temperaturas máximas de 40 a 50 °C, características que tornam seu cultivo possível em quase todos os continentes (LIMA, 2016; CAMPOS et al, 2016).

Peixoto (2008) disserta sobre a fertilidade do bambu, que se prolifera gerando novas plantas mesmo depois de cortado, auxiliando sua própria propagação e combatendo a erosão. As plantações de bambu não precisam de fertilizantes ou agrotóxicos, sendo facilmente cultivadas sem agredir o meio-ambiente, já que necessitam de poucos cuidados e só dependem do homem para o corte e remoção de colmos velhos.

Segundo Rodrigo, da Silva e Tejas (2015), seu processo de cultivo manufatureiro engloba desde a retirada da matéria-prima até a execução e comercialização de diversos produtos, serviços que requerem baixo grau de escolaridade e mão-de-obra com treinamento específico para trabalhar com bambu. Entretanto, o potencial produtivo de diversas espécies de bambus não tem sido devidamente explorado. Com a finalidade de reverter essa situação, foi promulgada a lei nº 12.484/2011, objetivando o desenvolvimento da cultura do bambu no Brasil, em busca de promover o manejo sustentado e o cultivo de bambu, com foco na valorização da atividade como instrumento de fomento do desenvolvimento socioeconômico regional (LOUREDO e DA COSTA, 2018).

Algumas das alternativas de cultivo ainda não testadas ou pouco exploradas referem-se ao cultivo de espécies de bambus in vitro. Esse procedimento pode ser

eficientemente usado para a obtenção de mudas de espécies economicamente importantes que apresentam dificuldades de propagação (RIBEIRO et al, 2016).

2.3.4 Imunização do bambu

Devido ao elevado teor de amido em sua constituição, os colmos de bambus são suscetíveis ao ataque de organismos xilógrafos, principalmente do coleóptero *Dinoderus minutus*, popularmente conhecido como caruncho. Dessa forma, visando garantir a qualidade, durabilidade e sua disponibilidade para utilização nos mais diversos fins, é de extrema importância a aplicação de técnicas adequadas de imunização (TIBURTINO et al, 2016).

Coutinho (2017) explica que os tratamentos químicos são os meios mais seguros para aumentar a durabilidade do bambu, concluindo que o tratamento preservativo aplicado a base de sais de boro e cobre pelo método de imersão prolongada se mostrou eficiente na concentração de 2%.

A seguir é apresentado um diagrama na Figura 8, elaborado com base na literatura, com os processos de conservação dos colmos desde logo após a colheita, englobando maturação, secagem e a imunização em si com aplicação de produtos químicos, como pentaclorofenol (óleo) ou o cromato de zinco (sais) (PEIXOTO, 2008).

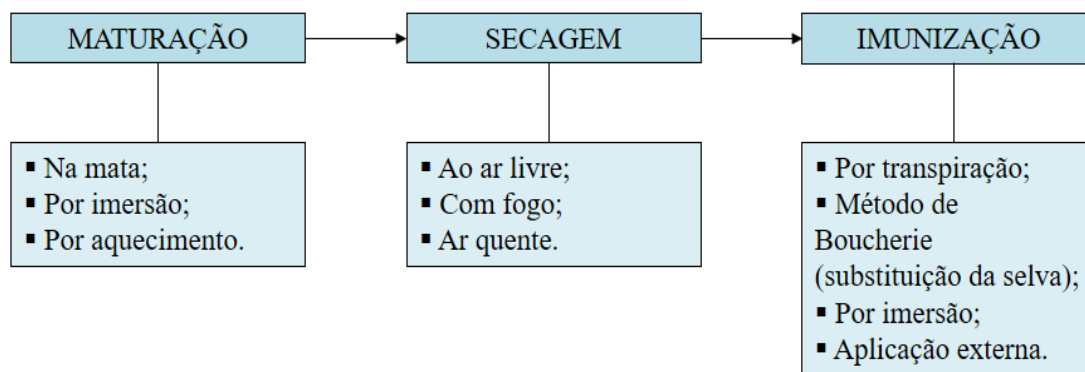


Figura 8 – Sistema de imunização do bambu.

Fonte: Autor, 2019

2.3.5 Fibras de bambu

A fibra de bambu é bastante conhecida por sua resistência mecânica, bem acima de outros materiais fibrosos naturais, sua rigidez e resistência são comparáveis às fibras de vidro (CHAUHAN et al, 2018). Tais fibras são tecidos muito resistentes e sua

principal função é dar força mecânica aos colmos, promovendo grande resistência à tração, à flexão e à rigidez na direção longitudinal do bambu, para suportar as cargas de vento a que são sujeitos durante seu ciclo de vida. (VIERIA et al., 2016).

Como bambu é um tipo de grama, sua microestrutura é significativamente mais heterogênea que a madeira, consistindo de pequenos feixes densos de fibras em um material de matriz menos denso, como visto na Figura 9. (PENELLUM et al, 2018).

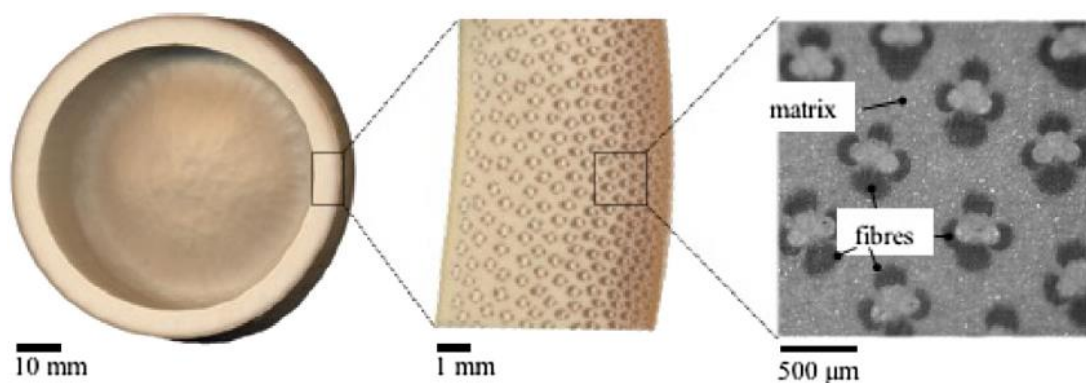


Figura 9 – Microestrutura da sessão do colmo.

Fonte: PENELLUM et al, 2018.

De acordo com Outa, Chavarette e Louzada (2016), a composição dessas fibras (Figura 10) são células alongadas e entrelaçadas, compostas de celulose, responsável pela resistência das fibras; hemicelulose que é uma variedade de moléculas complexas; lignina que é uma macromolécula formada por um sistema aromático; e extrativos formados por gorduras, proteínas e sais inorgânicos.

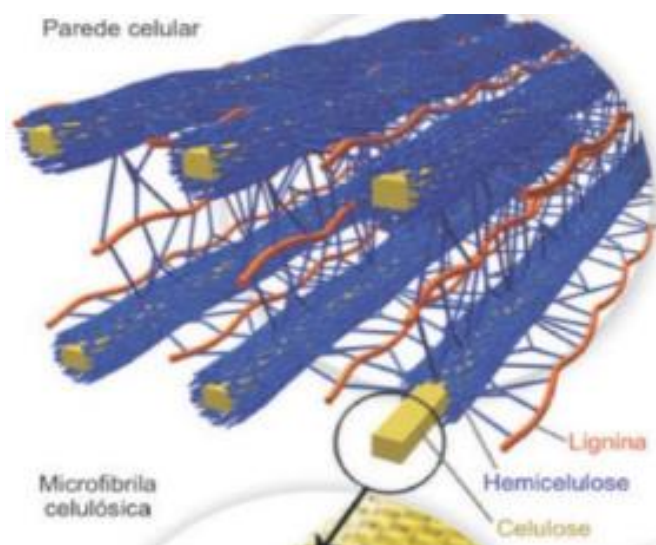


Figura 10 – Estrutura de uma fibra lignocelulósica.

Fonte: GEHLEN, 2014.

Seu diferencial em relação a outras espécies vegetais está no fato de que em sua estrutura, na forma de feixes, a celulose se orienta na direção das fibras, garantindo às mesmas, alta rigidez e resistência à tração neste sentido. A concentração do feixe de fibras varia significativamente ao longo da seção longitudinal do colmo, a quantidade de fibras por unidade de área aumenta conforme a aproximação da epiderme do bambu, ainda que o diâmetro médio das fibras nessa região seja menor (LIMA et al., 2016).

Em sua fase adulta, dependendo da espécie, o bambu possui entrenós com comprimento longitudinal acima de 300 mm, o que faz com que as fibras extraídas desse colmo sejam consideradas longas (LIMA, 2016).

Ghavami (2005) explica que dentre as fibras vegetais conhecidas e investigadas por diversos autores, as de bambu possuem uma das combinações mais favoráveis, que unem baixa densidade, elevada rigidez e resistência. A Figura 11 mostra as fibras de bambu dispersas (a) e organizadas em lâminas (b), prontas para serem utilizadas em compósitos laminados.



(a) (b)
Figura 11 - (a) Fibra de bambu e (b) lâmina de bambu.
Fonte: COSTA et al., 2007

As propriedades mecânicas das fibras do bambu estão diretamente relacionadas à estrutura do complexo de lignocarboidrato (CLC), onde microfibrilas cristalinas de celulose ligadas por hemicelulose são envoltas em uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose (SOUSA et al., 2017). São influenciadas sobretudo pelos fatores: espécie, idade, tipo de solo, condições climáticas, época de colheita, teor de umidade das amostras, localização das mesmas em relação ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nós nas amostras testadas e tipo do teste aplicado (GHAVAMI, 1989).

A Tabela 5 expõe algumas características das fibras de bambu.

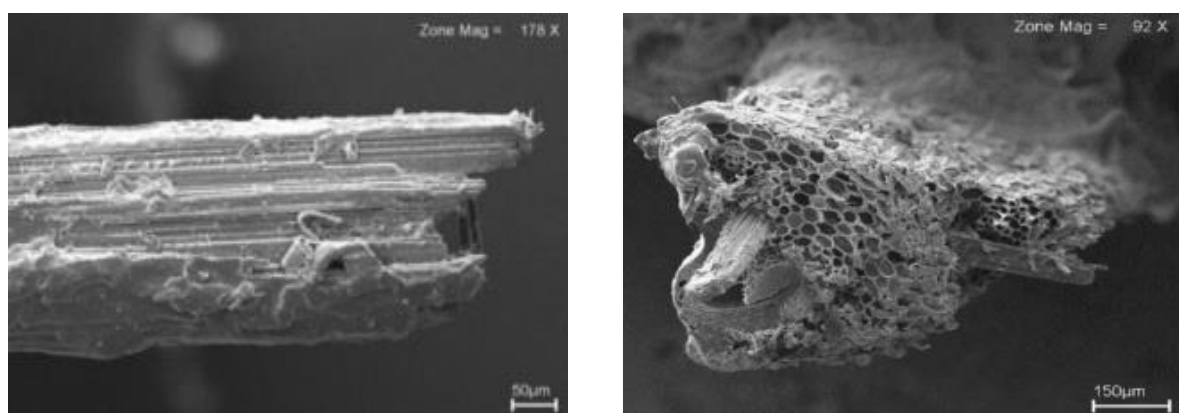
Tabela 5. Caracterização das fibras de bambu

Resistência a Tração (MPa)	Alongamento (%)	Diâmetro (mm)	Massa Específ. (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)
547,04	5,25	0,85	1,35	10

Fonte: COSTA et al., 2007

O elevado módulo de tensão máxima na ruptura das fibras de bambu é comparável aos do aço e concreto em proporção específica de resistência/densidade, devido a gama de ligações de hidrogênio nas moléculas de lignina, celulose e hemicelulose e às forças de Van der Waals entre a lignina e a celulose das microfibrilas (YOUSSELIAN, 2015).

A caracterização da microestrutura das fibras de bambu mostra características particulares, em sua análise superficial, como é possível observar na Figura 12, Costa et al. (2007) verificou resíduos ou lignina provenientes do processo de extração, micro cavidades, vazios, entrâncias, além de certa robustez em comparação a outras fibras.



(a)

(b)

Figura 12. a) Microestrutura superficial da fibra de bambu; e b) microestrutura da sessão da fibra de bambu

Fonte: COSTA et al., 2007

2.3.5.1 Extração das fibras de bambu

Os métodos de obtenção de fibras naturais longas provenientes do bambu a nível industrial ainda são escassos. As limitações para produção em larga escala ainda são uma fonte de investigação, pois a estrutura do bambu possui fibras muito bem ligadas à

matriz de lignina e suas respectivas fibras adjacentes, diferentemente de fibras como de coco e sisal, onde estas podem ser facilmente extraídos (LIMA, 2016).

Após o corte, o bambu necessita de métodos apropriados de maturação, secagem e imunização, para prolongar a durabilidade e qualidade das fibras, já explanados no item 2.3.4.

Existem três métodos para obtenção das fibras, classificados como: Processo Mecânico, Processo Químico e Processo Semi – químico. Em sua pesquisa, Viera et al., (2016) abordou que processo químico é o que menos afeta as fibras.

Empregando uma combinação de hidróxido de sódio e sulfato de sódio a temperaturas altas (aproximadamente 170 °C), a lignina é degradada efetivamente em fragmentos solúveis em água e fibras de polpa predominantemente compostas de celulose e hemicelulose (RYDHOLM, 1965). Outra técnica química é relatada por Yang et al. (2017), empregada com sucesso na separação dos feixes vasculares de bambu para se obter fibras individuais, a imersão em solução de peróxido de hidrogênio combinado com ácido acético glacial.

O processo Kraft possui grandes vantagens na separação de fibras, como maior rendimento e celulose de excepcionais resistências físico-mecânicas, chegando a remover toda a lignina presente no material de origem, logo, haverá um menor ataque das fibras quando expostas a matriz cimentícia, portanto, torna-se mais vantajoso trabalhar com esse tipo de separação. Em termos de matérias-primas, os processos de sulfato e Kraft se destacam pela sua versatilidade, não havendo praticamente limitação alguma do ponto de vista técnico (VIERIA et al., 2016).

2.4 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU

Segundo Depuydt et al. (2017), o interesse em aplicações de bambu em compósitos é baseado em um fator bioeconômico interessante: o bambu é de rápido crescimento, quase não necessita de fertilização, está abundantemente presente, tem alta capacidade de captar CO₂ e suas fibras tem propriedades mecânicas favoráveis.

As fibras de bambu podem ser utilizadas na confecção das placas de concreto, onde o tipo de cimento que se mostrou mais atrativo foi o cimento Portland CP II-E, em virtude deste tipo não atacar tão fortemente as fibras vegetais. Segundo Anjos, Ghavami e Barbosa (2003), o CP II-E já contém em sua constituição de 6 a 34% de escória de alto

forno moída, proporcionando assim uma matriz com menor teor de hidróxido de cálcio, com conseqüente diminuição do ataque alcalino à lignina das fibras.

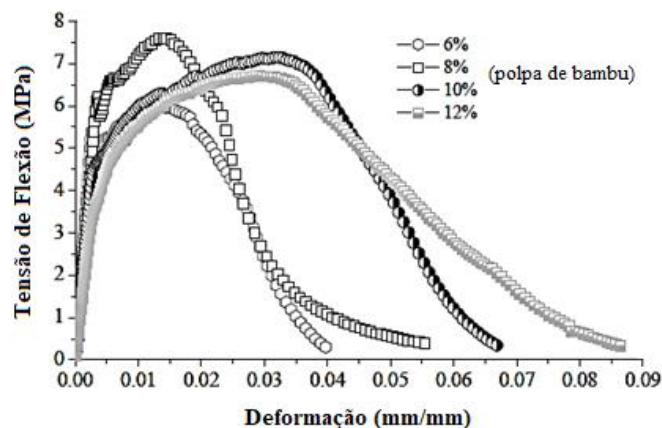
Em seu estudo, Costa et al. (2007), concluiu que os compósitos laminados de bambu se mostraram eficazes com relação às propriedades analisadas. O método de fabricação se mostrou bom para produção de um laminado de baixo custo e baixo impacto ambiental, além de boas propriedades. Os resultados da caracterização mecânica dos laminados foram superiores ou similares aos outros laminados de fibras vegetais pesquisados.

Já no estudo de Yang et al. (2017), foram investigadas propriedades mecânicas e resistência à fluência de compósitos de poli (ácido lático) reforçados com fibra de bambu (CPRFB). Os resultados revelaram que o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade dos CPRFB's se elevaram com o aumento da carga de fibra de bambu até 60% em massa e depois diminuíram acentuadamente à medida que a fibra aumentava. Também concluiu que com 60% em massa de fibra de bambu, o CPRFB exibiu a melhor resistência à fluência.

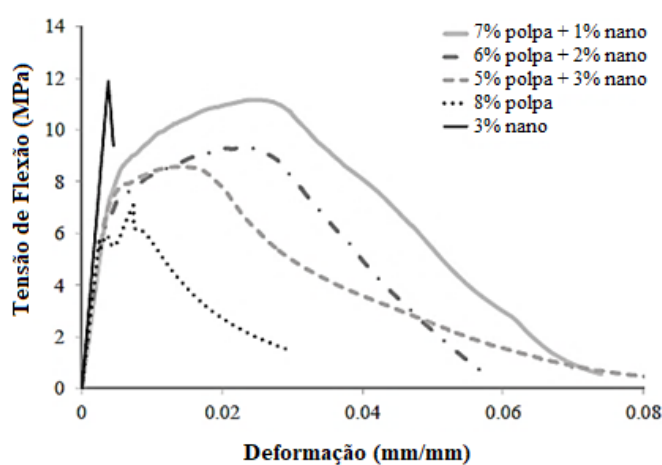
Lima (2016) acredita que uma vez encontrada alguma combinação possível de fibras de bambu e polipropileno que atenda às exigências de uma determinada aplicação e se estabelecendo um método de fabricação viável, é possível substituir os materiais hoje utilizados pela indústria por novas substâncias menos agressivas ao meio ambiente e, provavelmente, de menor custo econômico indireto.

Shah et al. (2016) concluiu que compósitos de bambu apresentam baixa condutividade térmica, particularmente em alta densidade, comparados a produtos equivalente de madeira. Estas características são de grande interesse nos projetos de construção de baixa energia.

A Figura 13 a seguir apresenta os gráficos de tensão vs. deformação obtidos por Correia et al. (2018), onde foram realizados ensaios de resistência à flexão em compósitos cimentícios reforçados com polpa celulósica de bambu e híbridos, reforçados com polpa e nanofibras de bambu.



(a)



(b)

Figura 13 – Curvas de tensão vs. deformação de resistência à flexão em compósitos cimentícios reforçados com (a) polpa celulósica de bambu e (b) polpa e nanofibras de fibras (híbridos). Fonte: CORREIA et al, 2018.

Através da Figura 13.a, podemos observar que o compósito reforçado com 8 % de polpa celulósica foi o que atingiu maior resistência, enquanto os reforçados com 10 % e 12 % tiveram maiores deformações antes da ruptura. Os compósitos híbridos apresentados na Figura 13.b parecem ligar-se fortemente à matriz e atuam como pontes de tensões em micro e nano fissuras, resultando em maiores deformações, enquanto o compósito reforçado apenas com nano fibras apresentou comportamento frágil (CORREIA et al, 2018).

Investigar com sucesso o desempenho desses compostos de bambu em propriedades dinâmicas, a fadiga e fratura por exemplo, é vital para dar aos engenheiros uma forte e sólida decisão de aplicar ou não esse material em compósitos, especialmente como um novo material de construção (ALI et al., 2018).

3 MATERIAIS

3.1 CIMENTO PORTLAND

Utilizou-se o cimento Portland CP II Z 32 do fabricante Elizabeth, escolhido por possuir 5% de material pozolânico em massa. O cimento está em conformidade com a norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Na Tabelas 6 são apresentadas suas características físicas, e na Tabela 7, sua composição química obtida através do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX), por energia dispersiva, no equipamento espectrômetro da marca Panalytical, modelo Epsilon 3-X, operando com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA, e gás hélio a pressão 10 atm./10 kgf/cm².

Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento Portland CP II-Z 32

Perda ao fogo (%)	Resíduo insolúvel (%)	Massa específica (kg/m³)	Superfície específica (cm²/g)	Finura 0,075mm (%)	Finura 0,044mm (%)	Início de pega (h:min)	Fim de pega (h:min)
5,97	8,95	3,06	4240	2,5	8,8	02:25	03:25

Fonte: DE BRITO, 2018

Tabela 7 – Propriedades químicas do cimento Portland CP II-Z 32 [%]

CaO	SiO₂	SO₃	Fe₂O₃	Al₂O₃	MgO	K₂O	P₂O₅	Ag
71,469	13,717	3,783	3,608	3,121	1,858	1,336	0,631	0,108

Fonte: Autor, 2019

3.2 METACAULIM

O metacaulim utilizado na pesquisa foi o Metacaulim HP Ultra, doado pela empresa Metacaulim do Brasil. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015) e ASTM C 618 (ASTM, 2015), este material é considerado uma pozolana de alta eficiência, devido sua composição química, mostrada na Tabela 8, obtida através do ensaio de FRX, onde foram utilizados o mesmo equipamento e parâmetros operacionais descritos no item acima. Sua massa específica é 2,55 g/cm³, conforme fabricante.

Tabela 8 - Composição química do Metacaulim HP Ultra [%]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Zr	Ti	Mn	P ₂ O ₅	CaO
47,642	38,887	9,189	1,236	0,168	1,163	0,127	0,985	0,333

Fonte: Autor, 2019

É possível observar que o teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ é superior a 95%, enquanto o teor de CaO é inferior a 0,5%.

Adicionalmente foi realizado o ensaio de difração de raios x (DRX) para verificar a cristalinidade do metacaulim, realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Física da Universidade Federal do Amazonas. O equipamento utilizado foi o Emyrean, operando com tensão de 40 kV e corrente de 40 mA, com análise qualitativa de identificação de fases através do *software* HihgSore Plus. A Figura 14 apresenta o digratograma de raio x obtido.

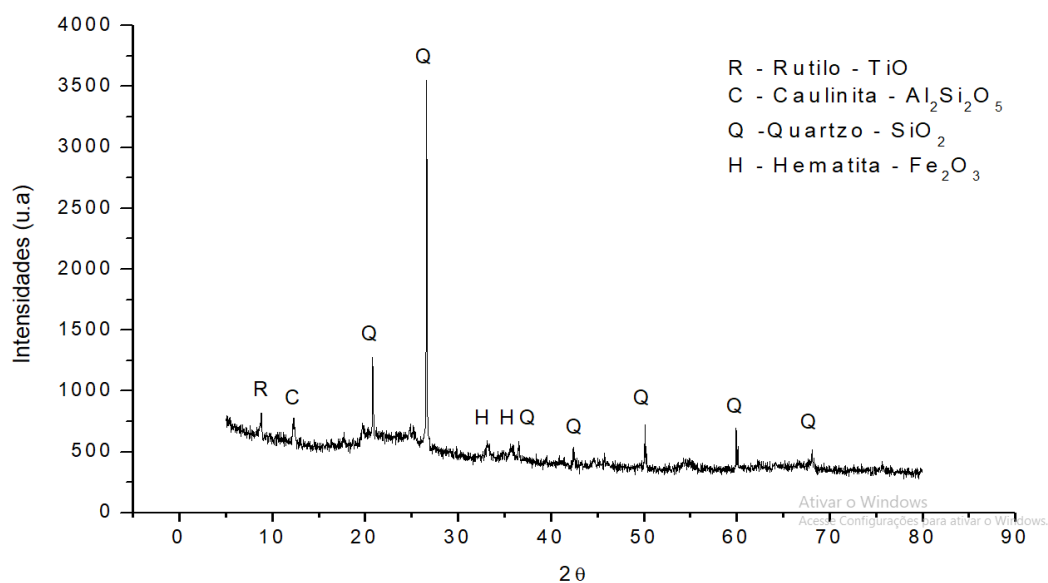


Figura 14 – Digratograma de raio x do Metacaulim HP Ultra
Fonte: Autor (2019)

Pode-se observar a presença de picos cristalinos, possivelmente são resíduos da calcinação da caulinita, porém, é admissível dizer que o material é em sua parte majoritária não cristalino, devido ao comportamento do gráfico, onde observa-se a presença de um halo amorfo aproximadamente entre os ângulos 15 e 30.

3.3 AREIA

A areia utilizada foi de uma beneficiadora da região de Manaus, classificada como areia média. Sua massa específica de $2,52 \text{ g/cm}^3$ foi obtida de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), e a curva granulométrica, mostrada na Figura 15, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2001), assim como o módulo de finura, 2,65. No preparo dos compósitos, o material utilizado foi apenas o que passou na peneira 1,18 mm.

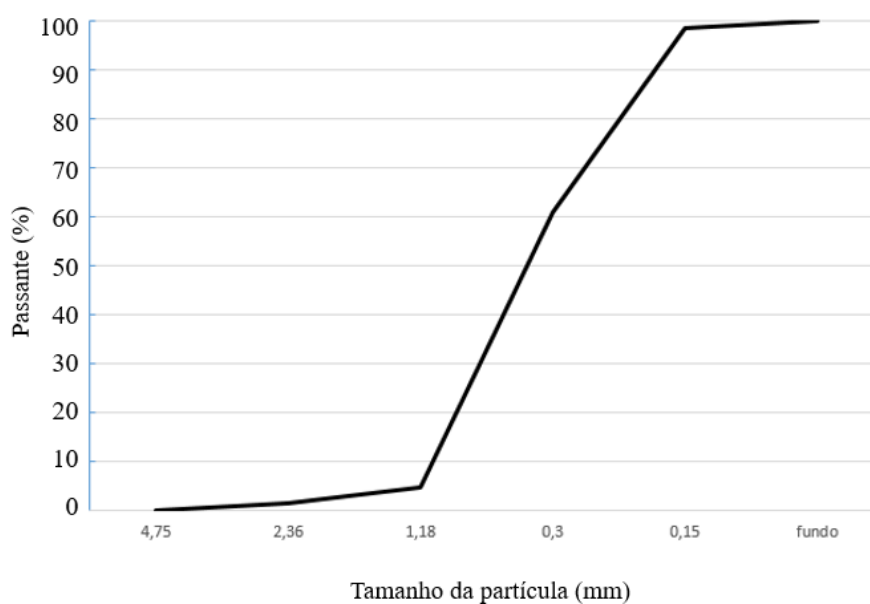


Figura 15 – Curva granulométrica da areia
Fonte: Autor (2019)

3.4 SUPERPLASTIFICANTE

Foi utilizado o superplastificante Glenium 51 da BASF, composto por uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício. Sua caracterização físico-química é mostrada na Tabela 9:

Tabela 9 – Caracterização físico-química do Glenium 51

pH	Solubilidade em água (%)	Massa específica (g/cm^3)	Sólidos (%)	Viscosidade (cps)
5 - 7	100	1,067 - 1,107	28,5 - 31,5	<150

Fonte: BASF, 2016

Cavalcante (2017) concluiu que este dispersante obteve o melhor desempenho quando comparado a outros produtos similares ao trabalhar com matriz cimentícia e fibras vegetais. A Figura 16 apresenta o gráfico resultado do ensaio de mini abatimento de Kanto com diversas dosagens do superplastificante em questão.

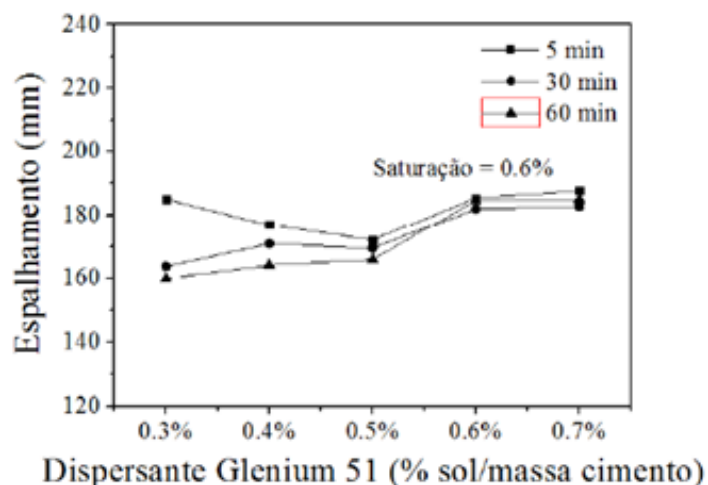


Figura 16 – Gráfico de dosagens do Glenium 51
Fonte: CAVALCANTE, 2017

3.5 ÁGUA

A água utilizada durante a fase experimental foi a proveniente do lençol freático sob a Universidade Federal do Amazonas, obtida através de poços artesianos. A Tabela 10 indica a caracterização físico-química da água, obtida por meio de um laudo técnico, elaborado pelo Laboratório de Análises Minerais – Lamin-Manaus, do Serviço Geológico Brasileiro – CPRM, cedido pela Prefeitura do Campus Universitário – PCU da Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Tabela 10 – Caracterização físico-química da água

pH	Condutividade (µS/cm)	Cor aparente (u Hazen)	Cor real (u Hazen)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	Si (ml/L)	Zn (mg/L)
4,94	14,1	0,3	0,3	0,0460	0,2210	0,0283	0,4775	5,2111	0,0377

Fonte: CPMR, 2018.

3.6 FIBRAS DE BAMBU

Nesta seção serão apresentados os procedimentos adotados desde a coleta dos bambus, passando pela extração até a imunização das fibras de bambu.

3.6.1 Coleta

Os bambus utilizados neste estudo foram da espécie *Bambusa vulgaris*, coletados de uma touceira localizada no perímetro da Universidade Federal do Amazonas (Figura 17). A idade dos bambus pode ser prevista com base na coloração amarelo/esverdeada observada na casca no momento da coleta, que indica a chegada à idade adulta. Os colmos foram cortados a 30 cm da base e os nós foram removidos, gerando vários colmos menores com, aproximadamente, 27 cm de comprimento (média da distância entre nós).

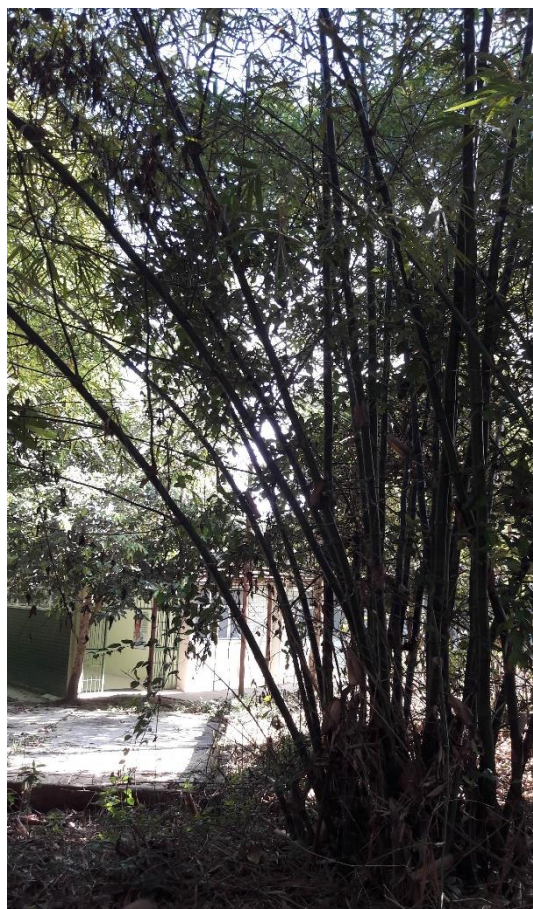


Figura 17 – Touceira de bambu *Bambusa vulgaris*.
Fonte: Autor (2019)

Estes colmos foram cortados até ponto de cavacos (Figura 18), com dimensões, em média, de 270,2 x 10,8 x 3,6 mm. As camadas mais externas e internas dos colmos foram descartadas, pois as externas são cascas, lisas e praticamente impermeáveis, já as camadas internas apresentam baixa densidade de fibras por unidade de área (LIMA, 2016).



Figura 18 – Cavacos de bambu.
Fonte: Autor (2019)

3.6.2 Extração das fibras longas e curtas

Após a obtenção dos cavacos, foram realizados dois procedimentos para extração das fibras de bambu, um para as fibras longas, outro para as curtas.

Para obtenção das fibras longas, foi realizada a extração manual dos feixes de fibras com os cavacos em seu estado natural de umidade, o que facilitou o trabalho, pois, o bambu ganha resistência quando seco. As sessões médias dos feixes extraídos foram de 1x1 mm e o comprimento médio de 270 mm (Figura 19).



Figura 19 – Feixes de fibras longas.
Fonte: Autor (2019)

Já para obtenção das fibras curtas, os cavacos remanescentes foram processados em um moinho de facas, seguido de peneiramento. As peneiras utilizadas foram as de malha 20 e 30. O material retido caracterizou as fibras curtas, com comprimento médio de 10 mm (Figura 20). O material passante, por serem partículas muito pequenas, praticamente pó, foi descartado.



Figura 20 – Fibras curtas.
Fonte: Autor (2019)

3.6.3 Imunização

Visando a conservação das fibras para garantir qualidade e durabilidade, além de prover resistência a ataques de insetos e de fungos, as fibras longas e curtas foram lavadas para eliminar resíduos superficiais em um ciclo único: primeiramente em água fria corrente por 60 minutos, seguido de lavagem com água destilada, em agitação contínua por mais 60 minutos.

Após esse processo, foram realizadas filtragem e secagem das fibras em estufa por 24 horas a 60 °C.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental deste estudo inicialmente foi composto pelo tratamento das fibras de bambu, seguido da caracterização física e mecânica das mesmas, além da caracterização mecânica da matriz cimentícia. Posteriormente, os compósitos foram produzidos e caracterizados, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 21.

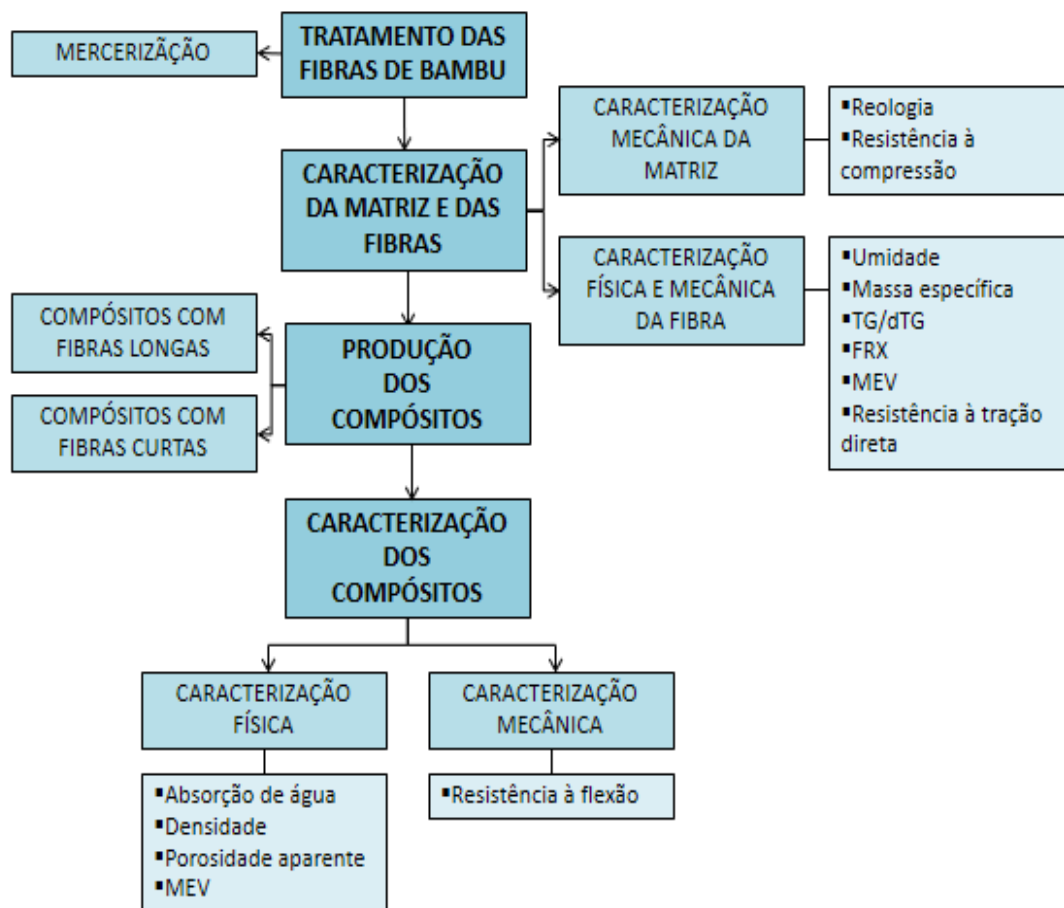


Figura 21 - Fluxograma com o procedimento experimental adotado.
Fonte: Autor (2019)

4.1 TRATAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU

As fibras longas e curtas foram tratadas quimicamente através do processo de mercerização, buscando não só remover parcialmente a hemicelulose e lignina, mas também melhorar a aderência fibro-matriz. As fibras foram imersas em uma solução de NaOH 10% (m/m) em agitação contínua à 60 ± 2 °C por uma hora. Em seguida, foram lavadas com água destilada até o pH da superfície das fibras se tornar neutro e secas em estufa por 24 horas a 60 °C.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BAMBU

A caracterização físico-mecânica das fibras de bambu foi realizada nos laboratórios de Materiais Compósitos da Amazônia e Físico-Químico localizados na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e Laboratório de Construções Rurais da Universidade de São Paulo.

Os ensaios realizados foram:

- Máximo teor de umidade;
- Massa específica;
- Análises térmicas: termogravimetria (TG) e derivada (dTG);
- Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX);
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Resistência à tração direta.

4.2.1 Determinação do máximo teor de umidade

O máximo teor de umidade (U) foi obtido através de uma adaptação da norma TAPPI T 264 cm – *Preparation of wood for chemical analysis* (2007). As amostras de cavacos secos ao ar em temperatura ambiente pesando cerca de 25 g cada foram imersas em água destilada por 48 horas para completa saturação do material. A água superficial foi removida com papel absorvente e, em seguida, as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,00 g, obtendo-se a massa saturada (M_{sat}). Para obter-se a massa seca (M_{sec}), as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas, seguido de pesagem até obter-se peso constante. Para o cálculo do máximo teor de umidade utilizou-se a equação:

$$U = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{M_{sat}} \cdot 100 \quad (1)$$

4.2.2 Determinação da massa específica

A massa específica foi obtida utilizando-se um picnômetro a gás hélio, modelo AccuPyc 1340 da Micromeritics, onde o gás ocupa todos espaços vazios e a massa específica é calculada pela diferença de pressão e volume do gás antes e depois da colocação das fibras. As amostras de 150 cm³ foram extraídas do material passante nas peneiras durante o processo de extração das fibras curtas, explicados no item 3.6.2.

4.2.3 Análise termogravimétrica (TG/dTG)

As análises térmicas foram realizadas no equipamento SDT Q600 da TA Instrument. As amostras da *Bambusa vulgaris*, naturais e tratadas com mercerização, foram aferidas a aproximadamente 10 mg, a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até a temperatura final de 800°C, com fluxo de gás N 5.0 de 30 ml/min. O cadinho utilizado nos testes foi de alumina de 90 µl sem tampa.

4.2.4 Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX)

As análises de espectrometria de fluorescência de raios-x da *Bambusa vulgaris* foram realizadas nas fibras naturais e após tratamento de mercerização, por energia dispersiva, no equipamento espectrômetro da marca Panalytical, modelo Epsilon 3-X, operando com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA, e gás hélio a pressão 10 atm./10 kgf/cm².

4.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para obtenção das imagens de microscopia eletrônica de varredura, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura da marca Tescan, modelo Vega 3, e o metalizador da marca Baltec, modelo SCD 050.

As fibras naturais foram extraídas unitariamente dos feixes após o processo de imunização, e as fibras tratadas, após o tratamento de mercerização. Em seguida, as amostras foram cortadas até o comprimento de 5 mm e coladas com fita dupla face nos

suportes porta-amostras do MEV (*stubs*). Estes foram levados ao metalizador, onde uma fina camada condutora de ouro foi depositada sobre as amostras através do processo de *sputtering*. Somente após esse processo, os *stubs* contendo as amostras foram levados ao MEV para captura das imagens.

4.2.6 Resistência à tração direta

A caracterização mecânica da fibra de bambu foi obtida através da realização do ensaio de tração direta, baseado nas normas ASTM C 1557 (ASTM, 2014) e NBR 7190 (ABNT, 1997). Utilizou-se papel de gramatura 75 g/m² como suporte, fita de alumínio e cola de secagem rápida, além das amostras de fibra, com comprimento de 70 mm cada, para a realização do ensaio, conforme o esquema ilustrado na Figura 22.

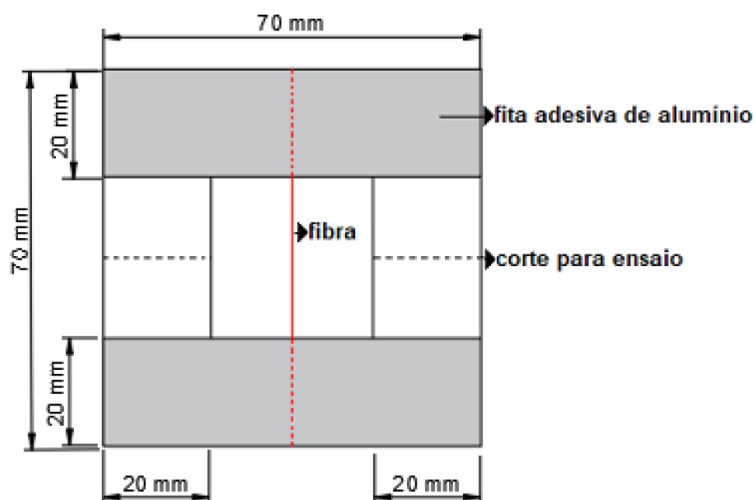


Figura 22 - Esquema de suporte para fibra.

Fonte: WEBER (2018)

O equipamento utilizado foi o AME-5kN da marca Oswaldo Filizola, com aquisição de dados por computador (Figura 23).

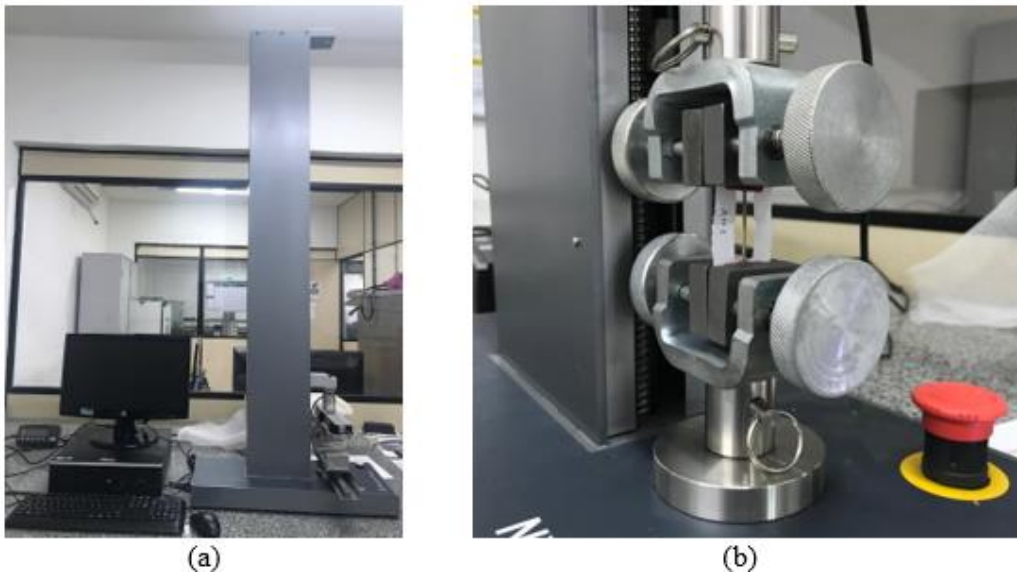


Figura 23 – (a) Equipamento AME-5kN e computador; (b) ensaio de resistência à tração direta da fibra de bambu.

Fonte: Autor (2019)

A tensão última de tração (σ_t) foi calculada segundo a equação a seguir, onde a área da seção transversal da fibra foi obtida por análise microscópica, através do microscópio óptico Olympus SZ61.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

F = força máxima de tração;

A = área da seção transversal.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

Para a caracterização mecânica da matriz cimentícia, foram realizados os ensaios de reologia (na pasta) e resistência à compressão (após 28 dias de cura). As matrizes foram preparadas utilizando uma argamassadeira, onde foram misturados inicialmente os materiais secos (cimento, metacaulim e areia) por 2 minutos, com verificação da homogeneidade. O superplastificante foi diluído na água e acrescentado aos poucos na argamassadeira, misturando todos os componentes por mais 2 minutos.

Baseando-se nos estudos de Melo Filho (2012), Cavalcante (2017) e Weber (2018), o traço definido foi de 1:1 (cimento:areia), sendo que 50% do cimento foi substituído em massa por metacaulim. O fator água/cimento (a/c) e o teor de

superplastificante foram definidos a partir dos resultados obtidos pelo ensaio de reologia, descrito a seguir.

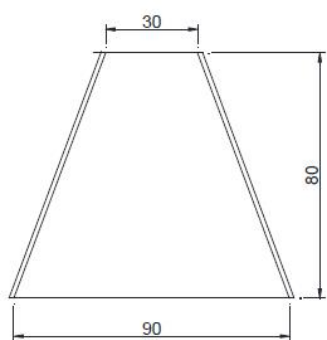
4.3.1 Espalhamento

Foi realizado o ensaio de mini abatimento utilizado por Kanto (1980) para avaliar a propriedade reológica da mistura fresca com os fatores a/c e teores de superplastificante apresentados na Tabela 11. O molde mostrado na Figura 24.a foi preenchido com a matriz e removido verticalmente, permitindo à mistura espalhar-se em uma placa de vidro sobre um papel milimetrado (Figura 24.b). Após 1 minuto, foram medidos dois diâmetros perpendiculares cuja média representa o espalhamento da matriz.

Tabela 11 – Ensaio de mini abatimento

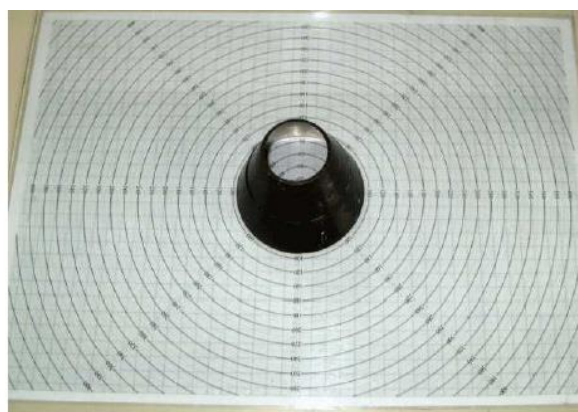
Amostra	Fator a/mc	Teor de superplastificante (%)
M1	0,40	0,50
M2	0,40	1,00
M3	0,40	2,00
M4	0,45	0,50
M5	0,45	1,00
M6	0,45	2,00

Fonte: Autor (2019)



medidas em mm

(a)



(b)

Figura 24 – Ensaio de mini abatimento: (a) dimensões do cone e (b) cone sobre a placa de vidro e papel milimetrado para realização do ensaio.

Fonte: MELO FILHO (2012)

4.3.2 Resistência à compressão

Os ensaios de compressão foram realizados em uma prensa universal, capacidade de 100T, fabricante Contenco (Figura 25), a velocidade de 5 mm/min, no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Estadual do Amazonas. Os corpos de prova foram preparados conforme NBR 7215 (ABNT, 1996): cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, sendo ensaiados após 28 dias da moldagem.

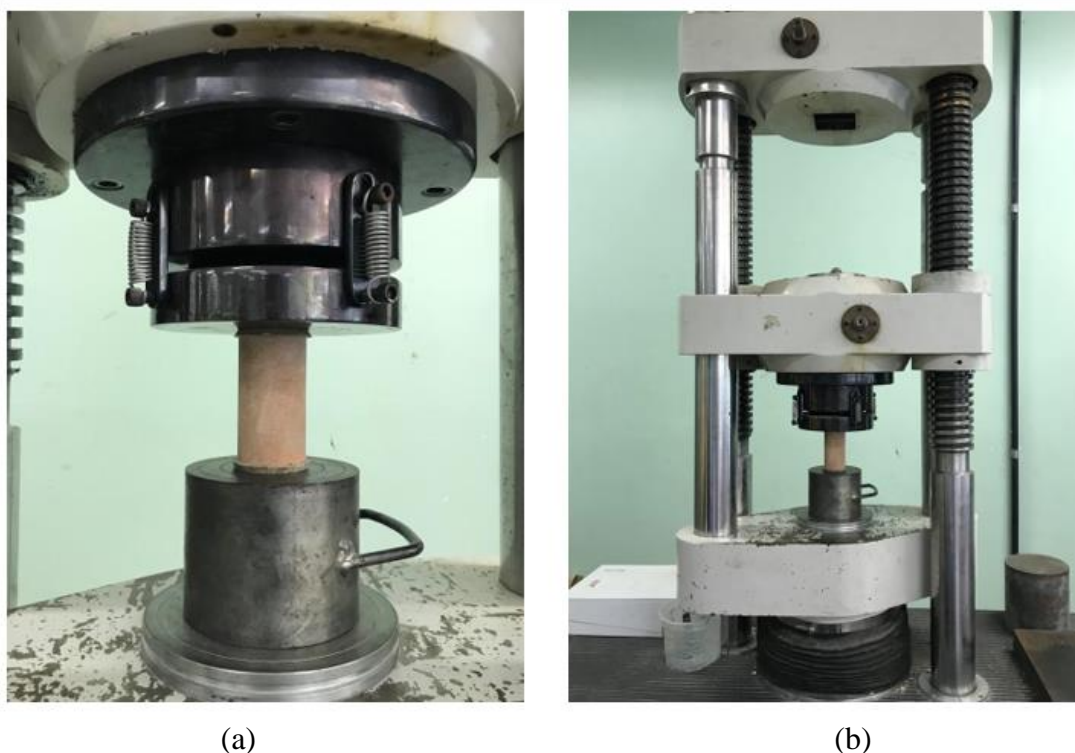


Figura 25 – Ensaio de resistência à compressão. a) corpo de prova e b) equipamento.
Fonte: Autor (2019)

4.4 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

Foram produzidos dois tipos de compósitos: com fibras longas (CFL) e com fibras curtas (CFC). As matrizes cimentícias de ambos são semelhantes em relação ao traço (definido no item 4.3) e pelo fator a/c , diferenciando-se pelo teor de superplastificante, devido à trabalhabilidade da argamassa com os diferentes comprimentos de fibra. Os teores fibra-matriz (volume/volume) foram definidos após análise de resultados obtidos na literatura envolvendo materiais similares, onde teores inferiores não representavam ganho de desempenho significativo, e teores superiores apresentavam menores resistências devido à maior porosidade e aglomeração de fibras.

A Tabela 12 indica o delineamento experimental e a Tabela 13, a composição em gramas dos compósitos.

Tabela 12 - Delineamento experimental dos compósitos

Nomenclatura	Tipo de fibras	Teor fibra-matriz
CFL0	Longas	0%
CFL2	Longas	2%
CFL4	Longas	4%
CFL6	Longas	6%
CFC0	Curtas	0%
CFC2	Curtas	2%
CFC4	Curtas	4%
CFC6	Curtas	6%

Fonte: Autor (2019)

Tabela 13 – Composição dos compósitos [g]

Nomen-clatura	Cimento	Meta-caulim	Areia	Água	Superplas-tificante	Fibras
CFL0	567,40	567,40	1134,80	498,11	18,23	0,00
CFL2	556,05	556,05	1112,10	488,14	17,86	21,60
CFL4	544,70	544,70	1089,40	478,18	17,50	43,20
CFL6	533,35	533,35	1066,71	468,22	17,13	64,80
CFC0	756,53	756,53	1513,06	613,93	97,21	0,00
CFC2	741,40	741,40	1482,80	601,65	95,26	28,80
CFC4	726,27	726,27	1452,54	589,37	93,32	57,60
CFC6	711,14	711,14	1422,28	577,09	91,38	86,40

Fonte: Autor (2019)

4.4.1 Compósitos com fibras longas

Os compósitos com fibras longas foram moldados como placas laminadas com orientação unidirecional das fibras. As porções destas foram distribuídas em duas camadas, intercalando-as com três camadas de matriz cimentícia, totalizando cinco

camadas por placa. O molde utilizado foi de acrílico, com dimensões de 400 x 400 x 10 mm, entretanto, como o comprimento das fibras é, em média, 270 mm, houve uma adaptação para as placas terem 300 mm nos lados paralelos à direção das fibras: foi colocado um delimitador de madeira, como mostra a Figura 26.a.

Inicialmente foi despejada no molde a primeira camada de matriz, produzida conforme explicação no item 4.3, regularizada com auxílio de espátula. Posteriormente, a primeira porção de fibras foi colocada manualmente de forma unidirecional (Figura 26.b). Estas etapas foram repetidas até completar as cinco camadas propostas, finalizado com a sobreposição de uma placa de aço para regularização da última camada.



Figura 26. a) Molde do CFL; e b) produção do CFL
Fonte: Autor (2019)

4.4.2 Compósitos com fibras curtas

Os compósitos com fibras curtas foram moldados com orientação aleatória das mesmas. A matriz cimentícia foi produzida de acordo com o item 4.3, sendo que ao final deste procedimento, as fibras curtas foram acrescentadas lentamente à argamassadeira ainda ligada, deixando misturar por mais 2 minutos. Em seguida, a mistura fresca foi lançada no molde de acrílico descrito no item 4.4.1, sem a adaptação (Figura 27), e regularizada com a sobreposição de uma placa de aço.

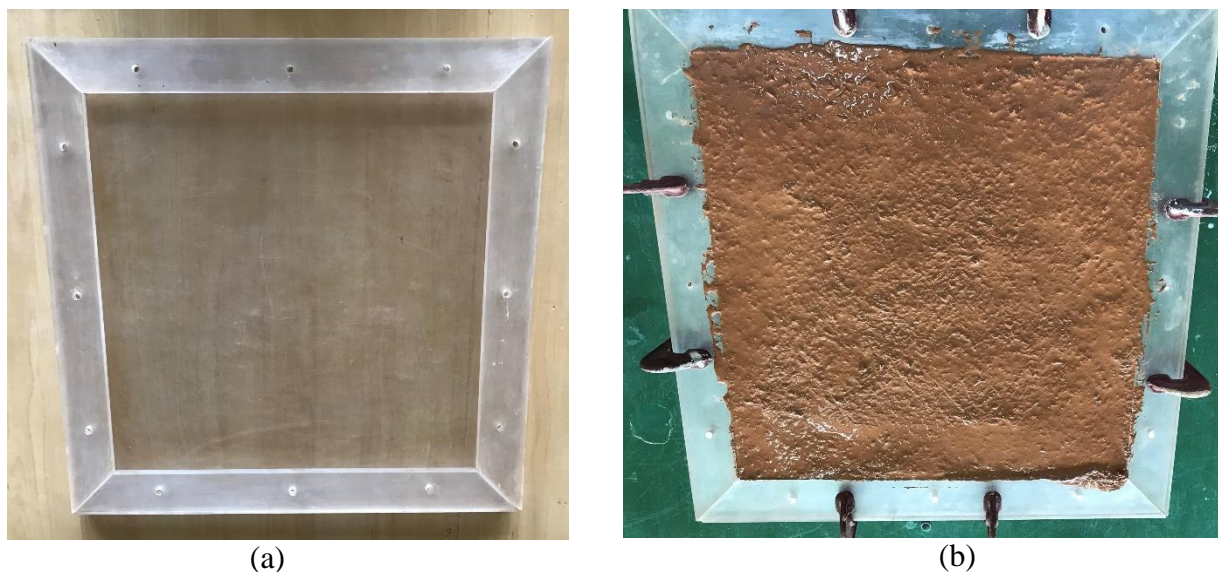


Figura 27. a) Molde do CFC e; b) produção do CFC
Fonte: Autor (2019)

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Nesta seção são apresentados os ensaios de caracterização física e mecânica dos compósitos que foram realizados após 28 dias de cura submersa.

4.5.1 Caracterização física dos compósitos

Os ensaios de caracterização física dos compósitos foram realizados para determinar a absorção de água (A_{BS}), densidade (ρ) e porosidade aparente (P_{ap}), conforme especificações da ASTM C 948 (ASTM, 2016), utilizando seis corpos de prova com dimensões de 50 x 50 mm de cada amostra.

Os corpos de prova ficaram submersos em água por 24 horas a aproximadamente 21°C, depois pesados em suspensão com uma balança hidrostática para definir a massa imersa (A). Com um papel toalha, a água superficial foi removida e uma nova pesagem foi realizada para determinar a massa saturada com superfície seca (B). Seguindo o procedimento, os corpos de prova ficaram em estufa a 100°C por, aproximadamente, 48 horas, até atingir peso constante, que representa a massa seca (C).

Assim, foi possível calcular as grandezas citadas de caracterização física com as seguintes equações:

$$A_{BS} = \frac{B - C}{C} \times 100 \quad (3)$$

$$\rho = \frac{C}{B - A} \quad (4)$$

$$P_{ap} = \frac{B - C}{B - A} \times 100 \quad (5)$$

4.5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras foram obtidas cortando-se as placas produzidas em cubos de, aproximadamente, 10 mm de lado. Logo após, as faces foram lixadas e o excesso de impurezas, removido. O processo de *sputtering* realizado em seguida e os equipamentos utilizados foram os mesmos descritos no item 4.2.5.

4.5.2 Resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em 4 pontos, de acordo com as recomendações da Rilem (1984), utilizando o equipamento AME-5kN da marca Oswaldo Filizola, com aquisição de dados por computador. As dimensões dos corpos de prova foram de 200 x 50 mm, e as cargas foram aplicadas a cada 1/3 do vão a uma velocidade de 0,5 mm/min (Figura 28).

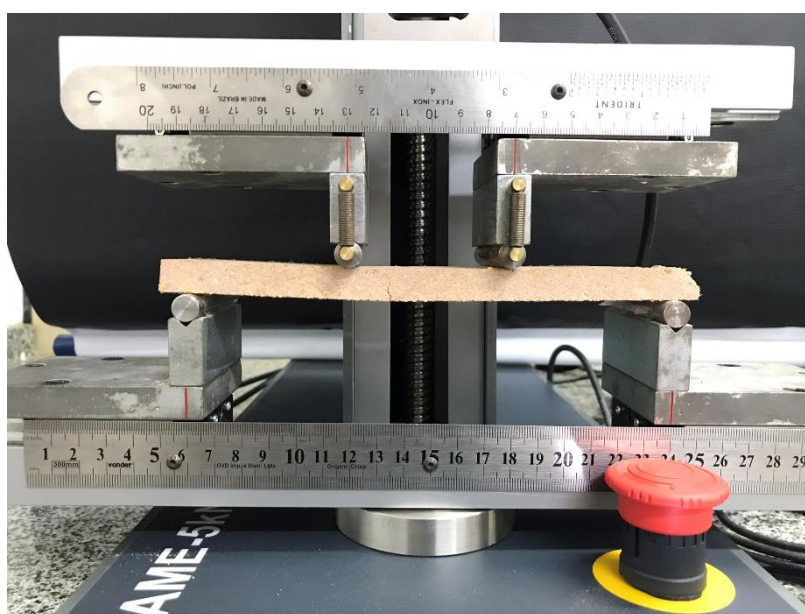


Figura 28. Ensaio de flexão em 4 pontos

Fonte: Autor (2019)

Com os dados adquiridos foi possível calcular a tensão de flexão (σ_f) e gerar gráficos de tensão x deformação, cujo coeficiente angular ($\frac{F}{\delta}$) da reta obtida foi utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade (E), e a área sob a curva foi utilizada para o cálculo do índice de tenacidade (T) através do método da RILEM (1984). As equações para determinação das grandezas citadas são as seguintes:

$$\sigma_f = \frac{6M}{bh^2} \quad (6)$$

$$E = \frac{23L^3}{1296I\left(\frac{F}{\delta}\right)} \quad (7)$$

$$T = \frac{A}{bh} \quad (8)$$

Onde:

M = momento de inércia;

b = largura da amostra, medido com escalímetro digital;

h = altura da amostra, medido com escalímetro digital;

L = comprimento da amostra, medido com escalímetro digital;

F = carga de ruptura;

δ = deslocamento máximo;

A = área sob a curva do gráfico.

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As avaliações estatísticas dos resultados experimentais foram realizados através da análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas nas propriedades dos compósitos em relação ao teor de fibras. O teste de Tukey foi utilizado para comparar as médias dos dados, ao nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nesta pesquisa, desde o tratamento e caracterização das fibras, passando pela caracterização da matriz até as propriedades dos compósitos.

4.1 TRATAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU

O aspecto adquirido pelas fibras após tratamento de mercerização e de secagem pode ser visto na Figura 29. As mesmas adquiriram uma coloração amarelada e foi possível observar desprendimento de fibras dos feixes, o que aumenta a área específica da biomassa e, conseqüentemente, a área de contato com a matriz cimentícia.



Figura 29 – a) Fibras longas tratadas e b) fibras curtas tratadas
Fonte: Autor (2019)

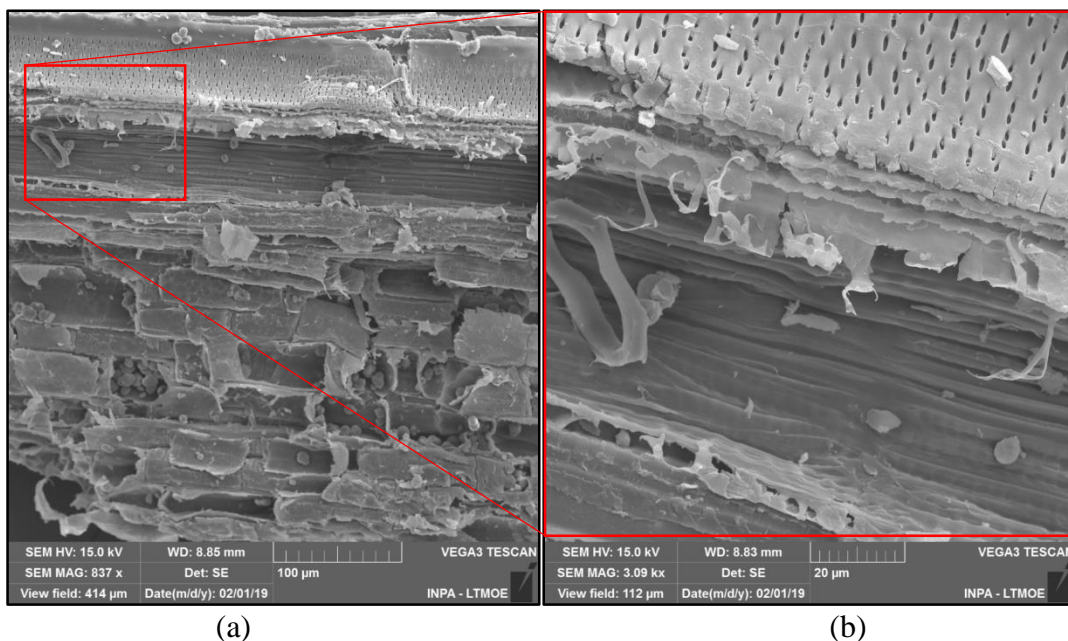
Essas características adquiridas foram melhor observadas através das imagens microscópicas obtidas com o MEV, apresentadas a seguir.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BAMBU

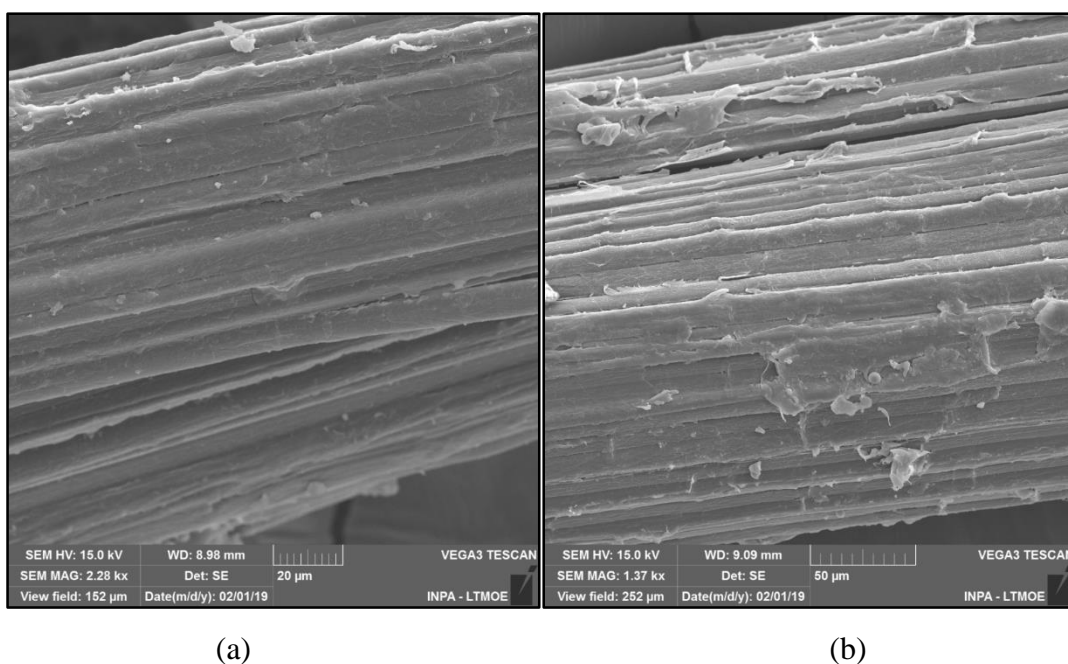
4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As alterações superficiais nas fibras vegetais alteram o modo como estas interagem quimicamente, tais modificações a nível molecular também influenciam na interação macroscópica do material, favorecendo compatibilidade morfológica entre fibras e matriz (LIMA, 2016).

Nas Figuras 30 e 31 é possível analisar essas mudanças superficiais sofridas nas fibras com o tratamento químico de mercerização.



(a) (b)
 Figura 30 – MEV da fibra de bambu natural. Ampliação: a) 837x e b) 3.090x.
 Fonte: Autor (2019)



(a) (b)
 Figura 31 – MEV da fibra de bambu tratada. Ampliação: a) 2.280x e b) 1.370x.
 Fonte: Autor (2019)

A Figura 30 apresenta as fibras de bambu em seu estado natural. A superfície do material está recoberta em sua grande parte por uma parede celular que se repete ao longo das fibrilas, com certa regularidade, sendo notáveis as células de lignina e ceras da fibra, o que compõe a matriz da unidade vegetal, além de impurezas. Essa estrutura celular repetida é basicamente composta de lignina, o que dificulta a posterior adesão com a

matriz cimentícia devido à alta polaridade dos componentes vegetais, consequência da alta quantidade de hidroxilas livres.

As imagens da Figura 31 apresentam as fibras de bambu após tratamento de mercerização. Nota-se que houve uma mudança na morfologia superficial da fibra, pela remoção de extravio, também observa-se que a limpeza superficial foi bastante eficiente, visto que além de remover as impurezas inerentes ao material, a parede celular que recobria as fibras foi extraída, deixando as microfibrilas expostas e permitindo plena visualização das mesmas, o que confere melhor rugosidade (ACHOUR, GHOMARI e BELAYACHI, 2017; WEBER, 2018).

O procedimento foi realizado com a concentração de NaOH a 10%, que se mostrou suficiente para a finalidade proposta que era a reação química na superfície das fibras, conforme orienta Melo (2016), que explica que em concentrações maiores, a solução de NaOH penetra as fibras e acaba deteriorando a estrutura interna das microfibrilas.

4.2.2 Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX)

Seguindo com as análises pré e pós tratamento de mercerização nas fibras da *Bambusa vulgaris*, a Tabela 14 apresenta as composições químicas em ambos períodos:

Tabela 14 – Composição química da *Bambusa vulgaris* [%]

Fibras	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cl	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	Ag	Sn	Mn	CaO	Ti
Naturais	49,96	30,37	7,012	6,863	3,218	1,301	0,626	0,201	0,086	-	-
Tratadas	17,87	12,85	5,756	25,47	-	9,723	1,784	0,067	0,159	25,63	0,472

Fonte: Autor (2019)

É possível observar que alguns óxidos diminuíram consideravelmente sua concentração, como o de potássio e de ferro, após a mercerização. Tal diminuição pode ser resultado da eliminação eficiente das impurezas superficiais, mas também da remoção parcial da parede celulósica. Outros óxidos, como o de fósforo e de silício, tiveram sua concentração aumentada, além da cal que primeiramente não foi detectada nas fibras naturais, entretanto, nas fibras tratadas sua concentração é relevante. Possivelmente, esses

elementos foram incorporados às fibras devido à impureza do hidróxido de sódio utilizado no tratamento químico.

Por outro lado, tratando-se de uma análise qualitativa, o acréscimo na concentração de alguns elementos pode ser exclusivamente devido à eliminação de componentes das fibras (comprovada nas imagens microscópicas – Figura 25), o que diminui a porcentagem de óxidos presentes nos componentes eliminados e aumenta a porcentagem de óxidos já presentes antes da mercerização.

4.2.3 Análise termogravimétrica (TG/dTG)

As curvas de TG e dTG da *Bambusa vulgaris* são apresentadas na Figura 32.

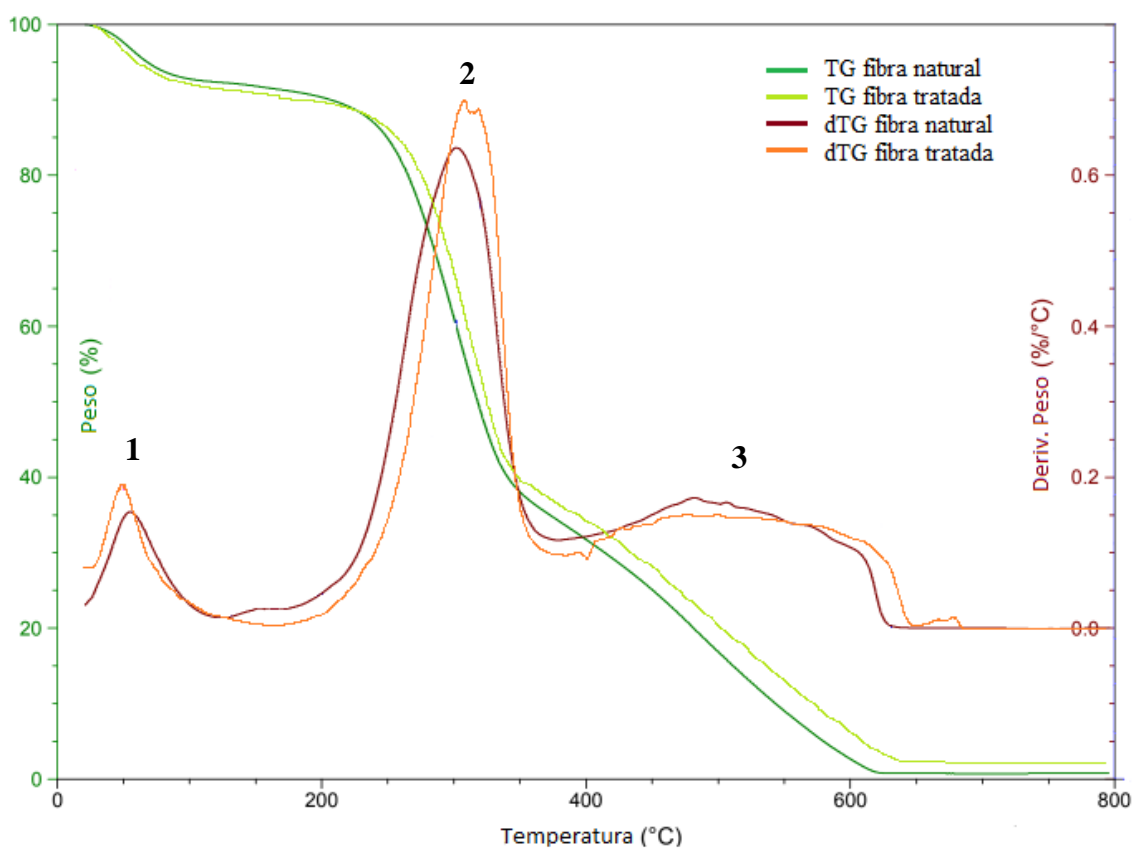


Figura 32 – Curvas TG/dTG da *Bambusa vulgaris*.

Fonte: Autor (2019)

Tratando-se de uma fibra lignocelulósica, o comportamento térmico apresentado pela *Bambusa vulgaris* durante o processo de degradação térmica é correspondente ao grau de interação e concentração das suas principais constituintes

estruturais: lignina, hemicelulose e celulose (KHALIL, BHAT & YUSRA, 2012; CHEN et al., 2011; YU et al., 2017; ZHAO, JIANG, CHEN, 2017).

Foram identificados três eventos térmicos similares para ambas condições da *Bambusa vulgaris*, tanto natural como após tratamento de mercerização, mostrados na Tabela 15, bem como as temperaturas observadas.

Tabela 15 – Temperaturas dos eventos térmicos referentes à Figura 32

Evento	1	2	3
Perda de Massa (%)	9,48	53,63	35,77
Tonset (°C)	-	251,81	-
T_{máx} dTG (°C)	56,46	303,1	619,89
Resíduo (%)		1,12	

Fonte: Autor (2019)

O primeiro estágio inicia-se à temperatura ambiente e vai até aproximadamente 150°C, resultando em 9,48% de perda de massa que, segundo a literatura, está relacionada à desidratação da amostra.

O segundo estágio é o evento dominante de degradação, onde houve a maior perda de massa (53,63%), iniciando a uma temperatura de aproximadamente 251,81°C e se encerra a aproximadamente 360°C. Este evento abrange a degradação dos compostos estruturais citados, sendo a hemicelulose o primeiro deles, pois é degradada em torno de 200°C. O segundo constituinte a ser eliminado é a celulose com temperatura de decomposição aproximadamente entre 280 e 350°C. A lignina é o composto mais resistente entre os três, apresentando decomposição térmica na faixa entre 200 e 600°C geralmente, mas podendo chegar aproximadamente à 900°C, dependendo da interação com outros compostos (BREBU; VASILE, 2010; STEFANIDIS et al., 2014; YU et al., 2017; ZHAO; JIANG; CHEN, 2017).

O terceiro e último evento é caracterizado por um conjunto de reações de decomposições que ocorrem simultaneamente até aproximadamente 620°C, que podem ser referentes a lignina remanescente do segundo estágio, haja vista que estudos indicam a presença de reações relacionadas com o processo de decomposição gradual de intermediários da lignina formados pela quebra da cadeia (BREBU; VASILE, 2010; STEFANIDIS et al., 2014; YU et al., 2017; ZHAO; JIANG; CHEN, 2017).

As fibras da *Bambusa vulgaris*, natural e tratada, apresentaram um resíduo de aproximadamente 1,5% correspondendo às cinzas geradas durante o processo.

4.2.4 Umidade e massa específica

O máximo teor de umidade, a massa específica da *Bambusa vulgaris* e seus respectivos coeficientes de variação são apresentados na Tabela 16, com valores médios de oito amostras.

Tabela 16 – Caracterização física da *Bambusa vulgaris*

Propriedade	Média	CV
Máximo Teor de Umidade	47,67%	0,08%
Massa específica	1,47 g/cm ³	0,12%

Fonte: Autor (2019)

Ao comparar com outras fibras vegetais, como a fibra de juta e malva, estudada por Cavalcante (2017) na qual a sua massa específica é de $1,3 \pm 0,5$ g/cm³, a fibra de bambu apresenta tal propriedade praticamente com o mesmo valor. Já em comparação com o aço CA-50, cuja massa específica é 7,83 g/cm³ (PEIXOTO, 2008), a *Bambusa vulgaris* é 82% mais leve, uma diferença relevante que pode conferir ao compósito uma propriedade buscada que é um produto com densidade baixa.

4.2.5 Resistência à tração direta

Através da análise microscópica das seções transversais dos feixes de fibras, cujos comprimentos variaram entre 0,338 a 1,520 mm (Figura 33), pode-se calcular a área das seções, e assim, obter os valores de resistência à tração direta (σ_t), apresentados na Tabela 17. Foram preparados 28 corpos de prova, entretanto, foram considerados apenas 20 deles para os cálculos estatísticos, pois estes apresentaram ruptura centralizada, como exige a NBR 7190 (ABNT, 1997). Os demais resultados foram descartados devido à ruptura ser próxima às garras (esmagamento) ou por desfibramento.

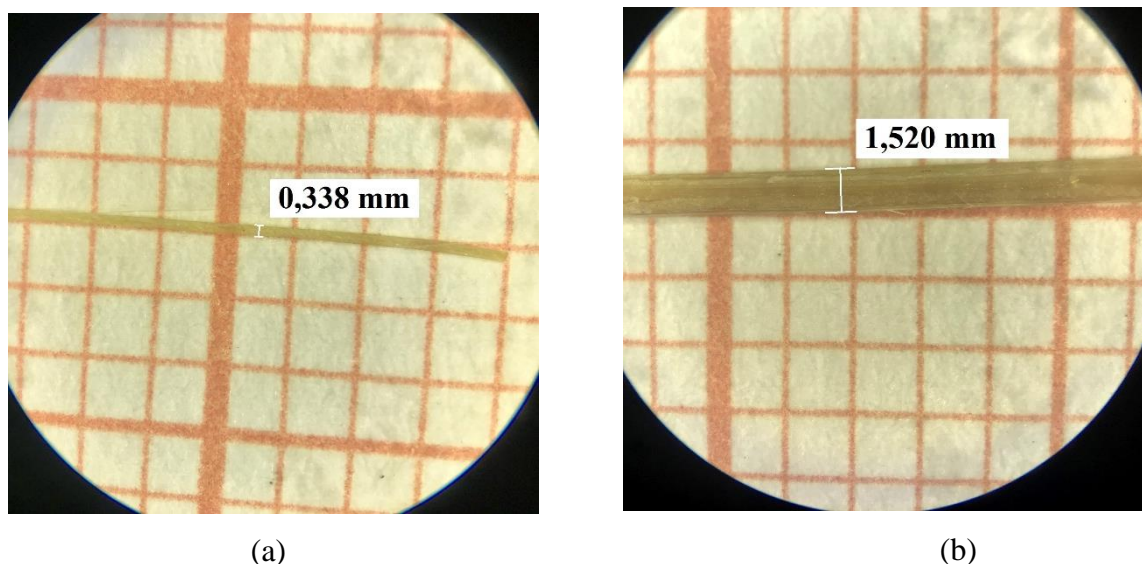


Figura 33. Sessões dos feixes de fibras
Fonte: Autor (2019)

Tabela 17 – Caracterização mecânica da fibra da *Bambusa vulgaris*

Ensaio	σ_t (MPa)	CV (%)
Resistência a tração	388,75	42,90

Fonte: Autor (2019)

Comparando o resultado obtido acima com a resistência à tração da *Bambusa vulgaris* obtida por Ghavami (1990) na região Sudeste do Brasil, que foi de 140,60 MPa, em observância ao coeficiente de variação, ressalta-se a heterogeneidade das fibras vegetais, inclusive da mesma espécie em diferentes regiões do país. Já em comparação com outra espécie de bambu, a *Dendrocalamus giganteus*, estudada por Ferreira (2007), cuja resistência à tração foi de 108,22 MPa, a *Bambusa vulgaris* apresentou tal propriedade 259,2% superior.

Ao equiparar com outras fibras naturais como a de juta, onde Oliveria (2013) obteve 391,47 MPa de resistência à tração, tem-se que as fibras da *Bambusa vulgaris* apresentaram média similar, enquanto comparado com os valores de 149 MPa das fibras de coco, 160 MPa das fibras de malva e 143 MPa das fibras de piaçava (AGUIAR, 2016), a resistência a tração das fibras de bambu é superior em 161%, 143% e 172%, respectivamente.

Por outro lado, fazendo uma comparação com o aço CA-50, cuja razão entre essa resistência e massa específica é 0,64 (Tabela 1), a razão apresentada pela *Bambusa*

vulgaris é 2,64, ou seja, 4 vezes superior, fator que atribui vantagem às fibras de bambu em substituição ao aço em materiais compósitos para construção civil.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

4.3.1 Espalhamento

O ensaio de mini abatimento foi realizado para definir o fator água/cimento e o teor de superplastificante da matriz. O espalhamento para as diferentes misturas testadas é apresentado no gráfico da Figura 34.

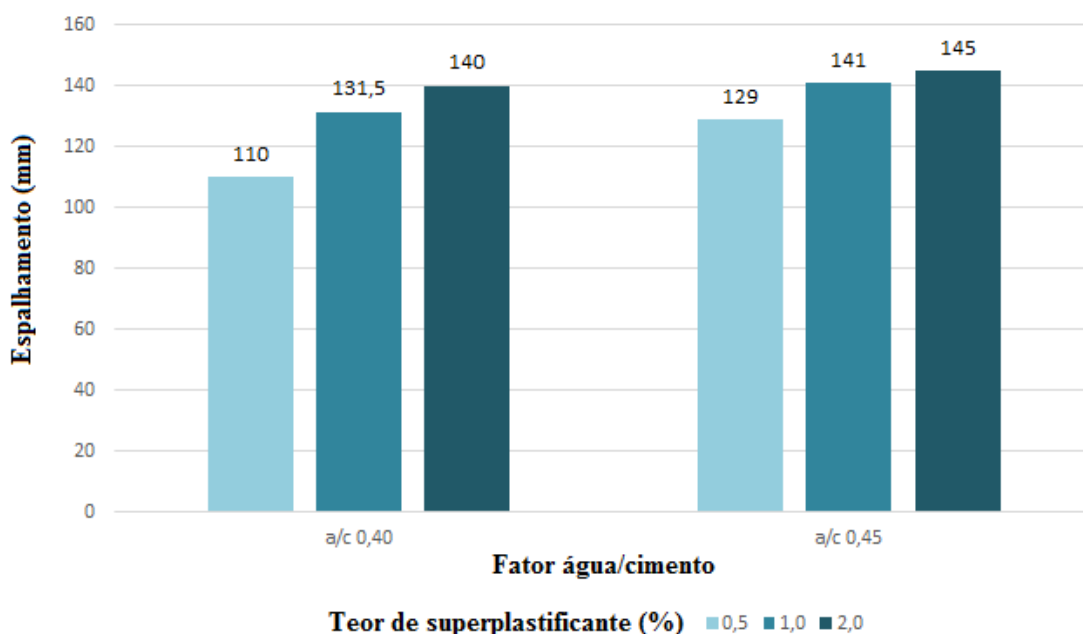


Figura 34 – Gráfico do espalhamento pelo fator a/c e teor de superplastificante
Fonte: Autor (2019)

Observa-se que as amostras se comportaram como esperado, quanto maior o teor de superplastificante, maior o espalhamento, e as argamassas com o fator a/c 0,45 apresentaram resultados superiores às argamassas com o fator a/c 0,40.

Ao buscar uma matriz que obtivesse o maior espalhamento, representando a fluidez ideal para produção dos compósitos, tem-se que a melhor amostra é a com fator a/c 0,45 e 2% de superplastificante. Ao primeiro momento, essa foi a única matriz escolhida. Entretanto, durante o processo de produção, verificou-se que esta fornecera a trabalhabilidade ideal apenas para os compósitos de fibras curtas, sendo inviável para os compósitos de fibras longas, pois as fibras longas emergiram à superfície das placas

durante a cura (Figura 35), devido a fatores como a própria fluidez da matriz, a densidade das fibras e o método como as placas foram produzidas, em camadas.



Figura 35 – Fibras longas na superfície da placa com matriz de fator a/c 0,45 e 2% de teor de superplastificante
Fonte: Autor (2019)

Logo, visando a semelhança das matrizes para melhor comparação futura, foi definido que o fator a/c não seria modificado, e testes foram realizados nas matrizes com 1,0% e 0,5% de teor de superplastificante, sendo este último o que apresentou melhor trabalhabilidade com as fibras longas.

Dessa forma, foram definidas as matrizes para os diferentes tipos de compósitos, apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Matrizes dos compósitos

Matriz	Fator a/c	Teor de superplastificante	Espalhamento
M _{FC} *	0,45	2,0%	145 mm
M _{FL} **	0,45	0,5%	129 mm

*M_{FC} – Matriz para fibras curtas;

**M_{FL} – Matriz para fibras longas.

Fonte: Autor (2019)

4.3.2 Resistência à compressão

As médias de cinco amostras da resistência à compressão (σ_c) das matrizes, aos 28 dias de idade, e seus respectivos coeficientes de variância estão demonstrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resistência à compressão das matrizes

Matriz	σ_c (MPa)	CV
CFC	43,20	11,01
CFL	39,21	6,25

Fonte: Autor (2019)

As matrizes apresentaram valores satisfatórios de resistência à compressão, entorno de 40 MPa. Contudo, a M_{FC} apresentou resistência superior de 10,17% em relação à M_{FL} , apesar de estudos prévios como Weber (2018) apontarem que o teor de superplastificante não interfere significativamente na resistência. Tal comportamento possivelmente está associado a maior porosidade da M_{FL} , uma vez que o teor de superplastificante inferior reduz a trabalhabilidade, interferindo no auto adensamento da argamassa, o que pode gerar maior volume de poros.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Nesta seção são apresentadas as análises dos resultados obtidos com os ensaios de caracterização física e mecânica dos compósitos produzidos (Figura 36) com 28 dias de cura.

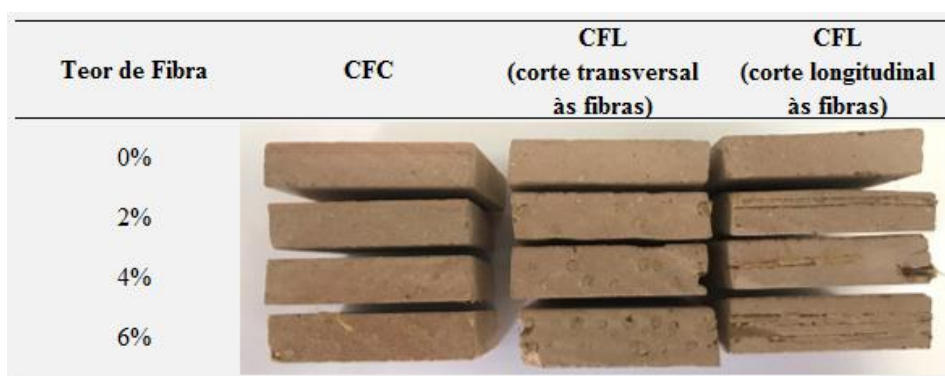


Figura 36 – Compósitos produzidos
Fonte: Autor (2019)

4.4.1 Caracterização física dos compósitos

A Tabela 20 apresenta os resultados médios e coeficientes de variação de seis amostras para as propriedades físicas: absorção de água (A_{BS}), densidade (ρ) e porosidade aparente (P_{ap}) dos compósitos. As letras indicam se há diferenças significativas entre os diferentes teores de fibras na matriz, considerando o mesmo tipo de fibra.

Tabela 20 – Caracterização física dos compósitos

Compósito	A_{BS} (%)	CV	ρ	CV	P_{ap} (%)	CV
CFC0	17,12 ^a	2,19	1,80 ^a	0,78	30,88 ^a	1,60
CFC2	17,31 ^a	1,70	1,79 ^a	0,64	31,06 ^a	1,12
CFC4	17,86 ^b	1,91	1,74 ^b	0,80	31,07 ^a	1,15
CFC6	17,79 ^b	1,46	1,71 ^c	0,73	30,44 ^b	0,78
CFL0	20,08 ^a	0,51	2,00 ^a	0,85	40,14 ^a	0,69
CFL2	19,82 ^a	2,07	1,95 ^a	1,45	38,64 ^b	2,10
CFL4	20,62 ^b	2,96	1,91 ^a	1,24	39,37 ^b	1,82
CFL6	21,81 ^c	1,81	1,78 ^b	2,90	38,72 ^b	2,56

* Letras diferentes na mesma coluna indicam que os valores diferenciam entre si ao nível de 5% pelo teste Tukey, letras iguais indicam que eles não diferem.

Fonte: Autor (2019)

Nota-se que a densidade é inversamente proporcional ao teor das fibras, como esperado, pois há uma substituição parcial da argamassa (mais densa) pelo reforço (menos denso), resultando em um material mais leve. Nos compósitos com fibras curtas, há uma diferença significativa nessa propriedade de 5,0% ao comparar CFC0 e CFC6, enquanto nos compósitos de fibras longas, a diferença entre CFL0 e CFL6 foi mais relevante e chegou a 12,4%. Apesar da densidade dos compósitos com fibras longas ter surtido maior decréscimo em relação ao teor reforço-matriz, os compósitos com fibras curtas apresentaram valores menores no geral, com diferença média de 10% entre as matrizes dos dois tipos com 2% e 4% de fibras. Nas matrizes com 6% de reforço, a diferença entre elas foi de apenas 4%.

A menor densidade obtida foi a do CFC6 com média de 1,71, 4,0% menor que o resultado de Cavalcante (2017), cuja pesquisa foi baseada em matriz cimentícia reforçada com tecido de juta e malva e obteve 1,78 de densidade. Já em comparação ao

trabalho de Weber (2018), cujo reforço era com fibra de curauá, a densidade do CFC6 é inferior em 10,5%, mostrando que, assim como outras fibras naturais, as fibras da *Bambusa vulgaris* reduzem consideravelmente a densidade das matrizes cimentícias.

Em relação à absorção de água, observa-se que pouco se modifica conforme aumento do teor de reforço nos compósitos com fibras curtas, porém, há diferença significativa entre CFC2 e CFC4. Já nos compósitos de fibras longas, o CFL2 não apresentou diferença significativa em relação à CFL0, enquanto o CFL4 e CFL6 obtiveram médias significativamente superiores, chegando a 8,6% maior que a referência.

Os compósitos de fibras longas possuem maior capacidade de absorção de água que os de fibras curtas (Figura 37), em média, 17,5% superior. Contudo, todas as amostras apresentaram valores médios inferiores a 25%, valor referência para placas cimentícias reforçadas com fibras de acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2016).

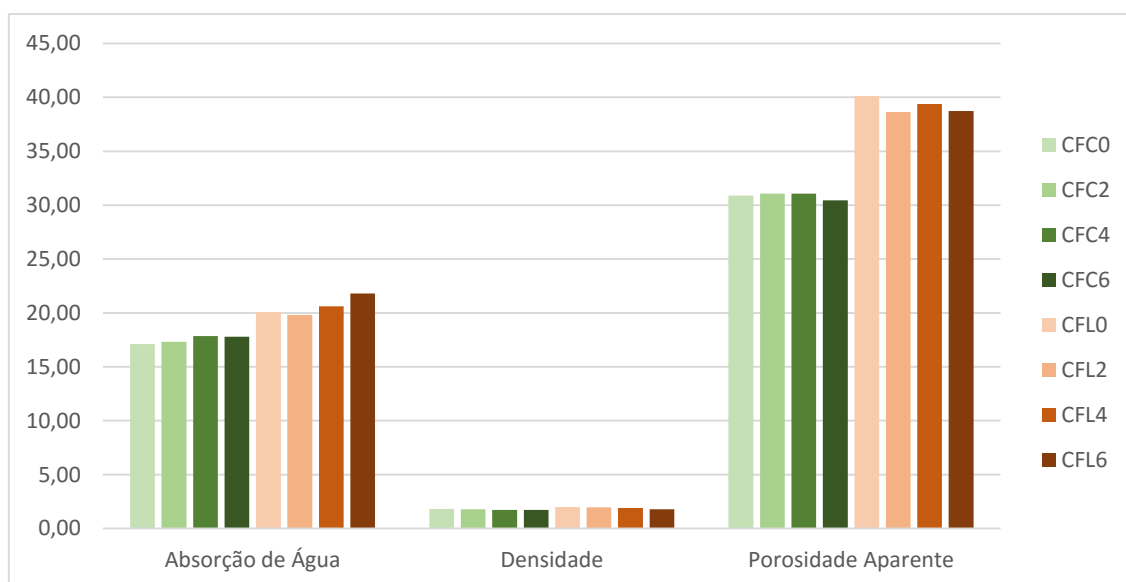


Figura 37 – Análise das diferenças das propriedades físicas entre os tipos de compósitos.

Fonte: Autor (2019)

No que concerne à porosidade aparente, os compósitos com fibras longas também manifestaram valores superiores aos valores compósitos com fibras curtas, em média de 26%, porém, com redução significativa em relação à matriz testemunha. Por outro lado, apenas o CFC6 apresentou diferenças significativas em relação aos demais compósitos com fibras curtas. Com isso, pode-se dizer que a reforço com fibras de bambu na matriz não aumentou o volume de poros e pouco interferiu na absorção de água.

4.4.2 Caracterização mecânica dos compósitos

Os valores médios de resistência à flexão (σ_f), módulo de elasticidade (E) e tenacidade (T) dos compósitos produzidos e seus respectivos coeficientes de variação estão demonstrados na Tabela 21. As letras indicam se há diferenças significativas entre os diferentes teores de fibras na matriz, considerando o mesmo tipo de fibra.

Tabela 21 – Caracterização mecânica dos compósitos

Compósito	σ_f [MPa]	CV (%)	E (GPa)	CV (%)	T (kJ/m ²)	CV (%)
CFC0	4,81 ^a	10,36	11,79 ^a	12,99	0,09 ^a	18,92
CFC2	6,81 ^b	7,41	20,39 ^b	9,40	0,16 ^a	14,84
CFC4	5,42 ^c	13,35	10,61 ^c	12,23	0,28 ^b	13,99
CFC6	6,37 ^c	5,79	12,85 ^c	25,71	0,40 ^c	11,92
CFL0	4,94 ^a	13,54	15,85 ^a	34,92	0,08 ^a	45,32
CFL2	4,74 ^a	20,14	13,69 ^a	43,58	0,05 ^a	41,52
CFL4	4,67 ^a	21,98	10,15 ^b	59,49	0,11 ^b	19,72
CFL6	4,11 ^a	11,62	8,20 ^b	16,14	0,11 ^b	6,65

* Letras diferentes na mesma coluna indicam que os valores diferenciam entre si ao nível de 5% pelo teste Tukey, letras iguais indicam que eles não diferem.

Fonte: Autor (2019)

Ao analisar os resultados dos compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas, observa-se que houve um aumento na resistência a flexão com o acréscimo de fibras, porém, esse aumento não foi proporcional ao teor de fibras. O CFC2 atingiu resistência 41,6% maior que CFC0, enquanto o aumento sofrido por CFC4 (maior teor de reforço) foi de somente 12,7%, ambos com diferenças significativas. O CFC6 com resistência 32,4% superior que CFC0 não diferiu significativamente dos demais.

Em comparação com o trabalho de Oliveira (2013), o CFC2 com apenas 2% de fibras curtas apresentou resistência a flexão de somente 11,5% inferior ao compósito reforçado com 8% de fibras de malva (4 vezes maior concentração de fibras da *Bambusa vulgaris*), cujo valor médio foi de 7,96 MPa. Melo Filho (2012) produziu compósitos com os mesmos teores de fibras curtas de sisal, e seus resultados foram inferiores em 26,6%, 11,4% e 25,4% em relação aos CFC2, CFC4 e CFC6, respectivamente.

Os compósitos com fibras longas comportaram-se diferentemente quando solicitados a flexão, como é possível observar na Figura 38, com valores médios sem diferenças significativas da matriz sem fibra.

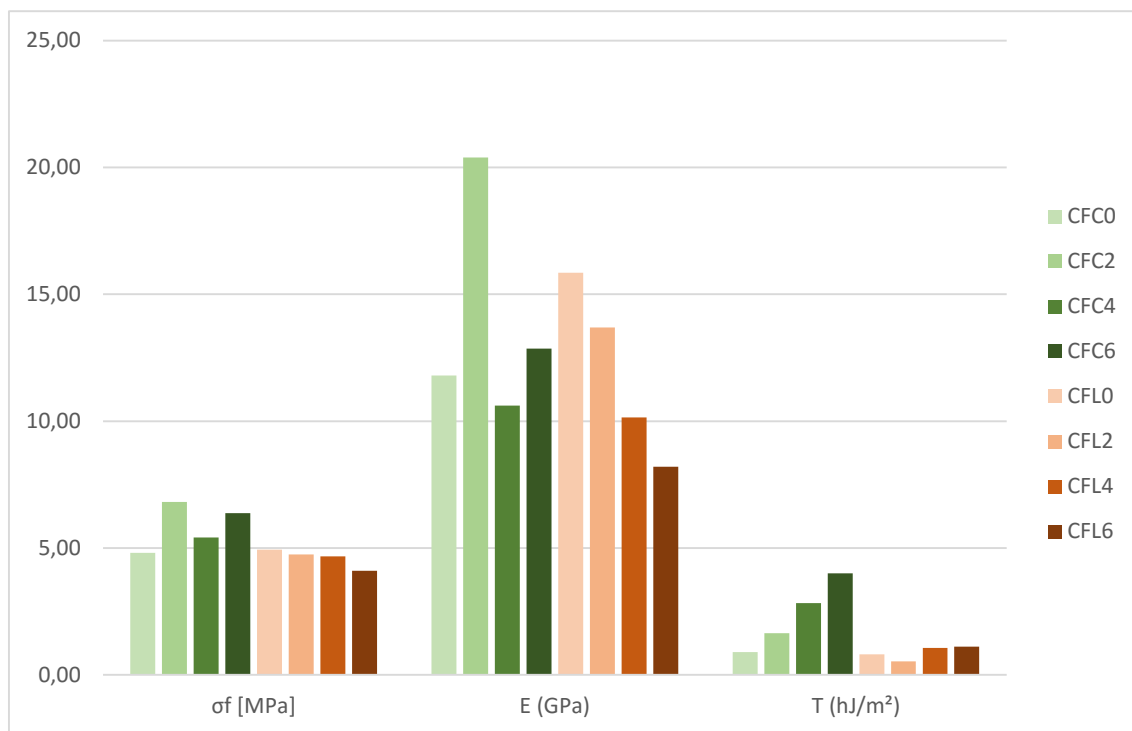


Figura 38 – Análise das diferenças das propriedades mecânicas entre os tipos de compósitos.

Fonte: Autor (2019)

O módulo de elasticidade nos compósitos de fibras longas diminuiu significativamente a medida que o teor de reforço aumentou, o resultado médio do CFL6 chegou a 48,3% menor que CFL0, ou seja, as fibras longas influenciaram negativamente a rigidez do material no trecho linear elástico do gráfico tensão de flexão x deformação. Nos compósitos de fibras curtas, o destaque foi para o módulo de elasticidade do CFC2, cujo valor médio atingiu 20,39 MPa, que representa um aumento de 72,9% em relação a CFC0, diferenciando-se significativamente dos demais.

O comportamento mecânico dos compósitos pode ser visto com os gráficos de tensão de flexão por deformação nas Figuras 39 e 40.

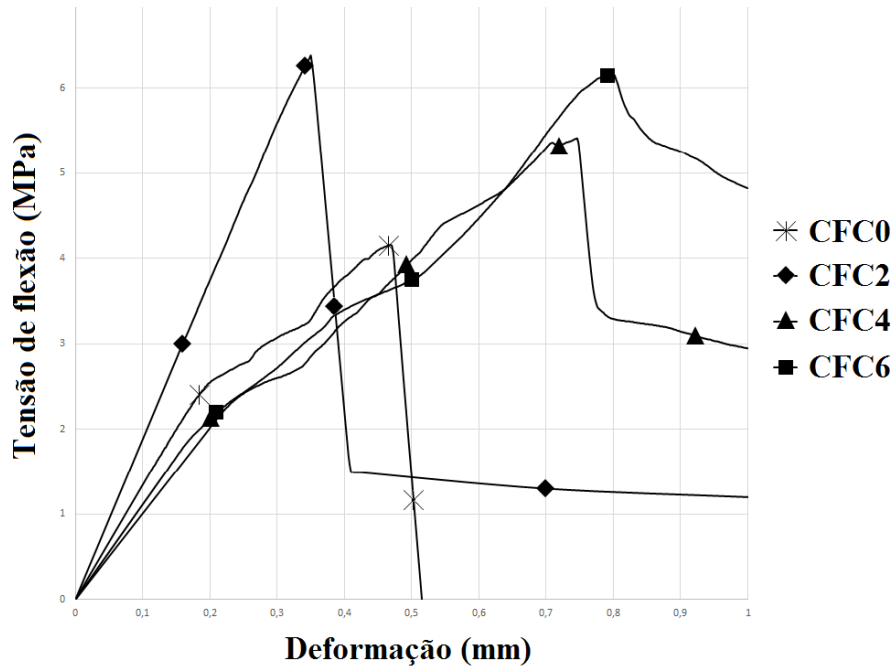


Figura 39 – Curvas típicas tensão de flexão x deformação dos compósitos com fibras curtas.

Fonte: Autor (2019)

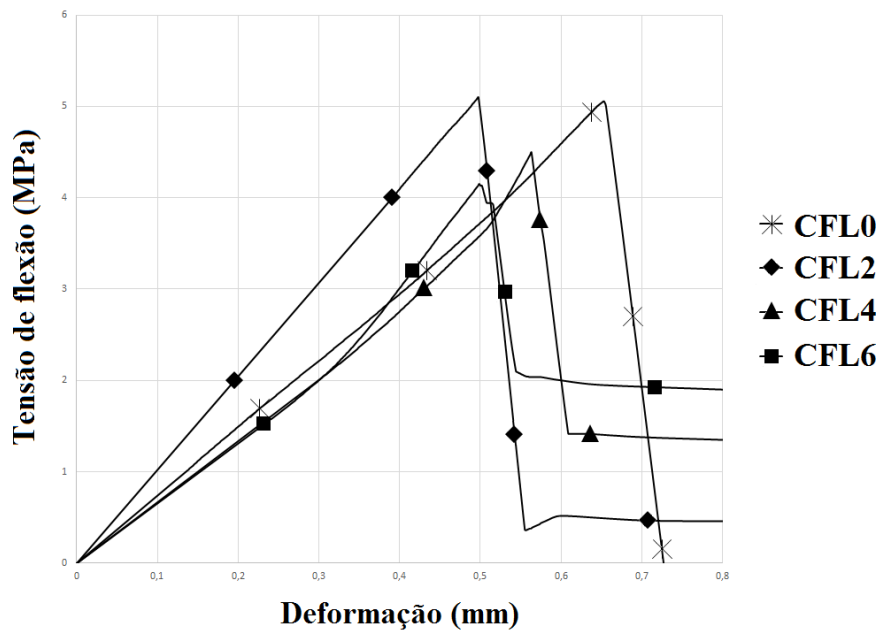


Figura 40 – Curvas típicas tensão de flexão x deformação dos compósitos com fibras longas.

Fonte: Autor (2019)

Pelos gráficos acima é possível verificar que os compósitos produzidos apresentaram comportamento semelhante, com um trecho linear elástico seguido de ruptura, e um trecho de fissuração pós ruptura, onde as fibras desempenharam o papel de reforço, aumentando a tenacidade dos compósitos. Todavia, esse comportamento é

considerado frágil, uma vez que a ruptura é simultânea ao surgimento da primeira fissura, sem a aparição de múltiplas fissuras, o que aumentaria sua resistência última, característica dos compósitos reforçados com fibras conforme à literatura.

Por outro lado, vale ressaltar que as matrizes com fibras curtas apresentaram maiores tenacidades em proporção ao teor de reforço com diferenças significativas. As porcentagens de aumento dos CFC2, CFC4 e CFC6 foram de 77,8%, 211,1% e 344,4%, respectivamente, em relação a CFC0. O reforço com fibras longas não apresentou diferenças significativas em CFL4 e CFL6, contudo, a tenacidade de CFL2 sofreu uma queda de 37,5% comparado a CFL0.

4.4.3 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

As imagens de MEV foram obtidas para análise da compatibilização superficial entre fibras e matriz nos compósitos produzidos (Figuras 41 e 42).

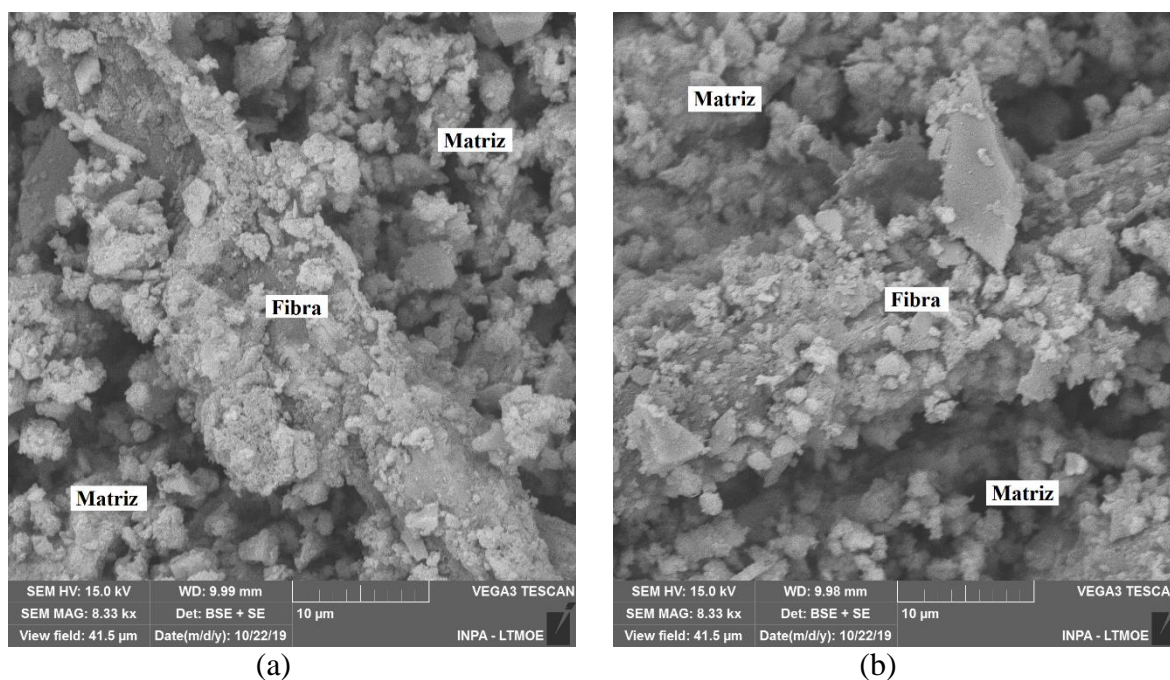


Figura 41 – MEV do CFC. Ampliação: 8.330x.

Fonte: Autor (2019)

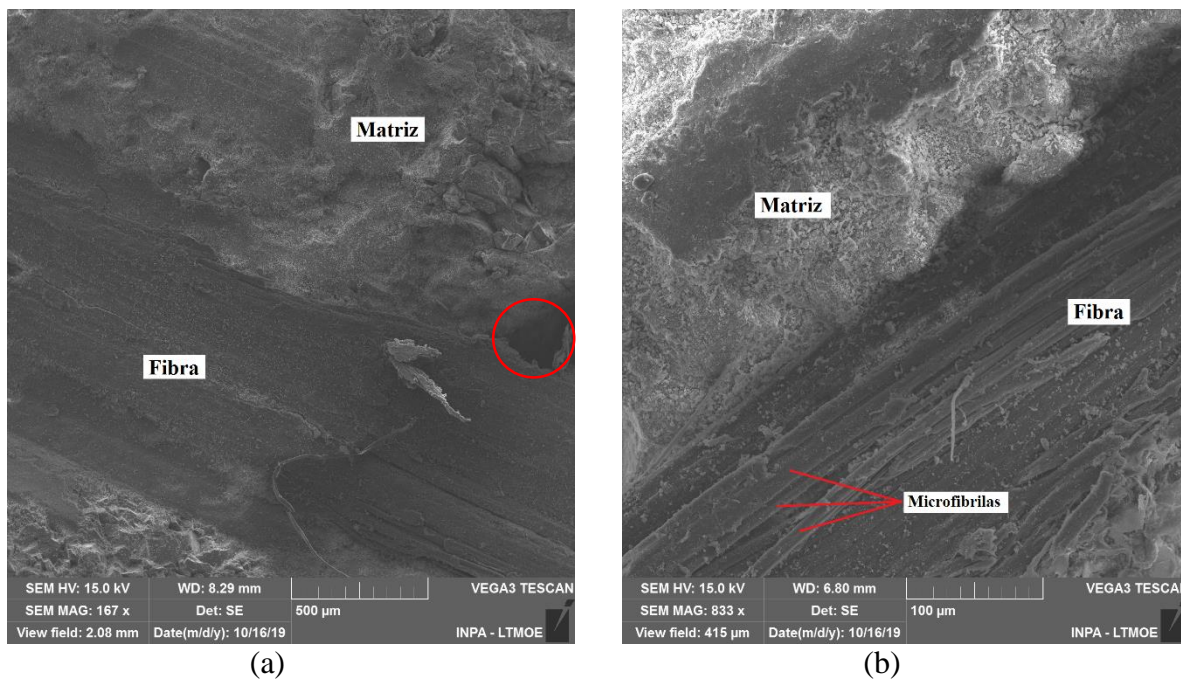


Figura 42 – MEV do CFL. Ampliação: a) 167x e b) 830x.
Fonte: Autor (2019)

A Figura 41 apresenta imagens de MEV do CFC, onde é possível observar que a superfície das fibras curtas de bambu foi recoberta por partículas da matriz cimentícia em praticamente 100% de sua área, e que, apesar da porosidade observada na fase dispersante, não há vazios significativos na interface fibra-matriz, sugerindo boa adesão superficial entre as fases dos compósitos.

Similarmente ao CFC, as imagens de MEV do CFL indicaram boa compatibilização superficial entre a matriz cimentícia e as fibras longas de bambu, uma vez que a mudança entre as fases é notada através da diferença nos tons de cinza, sem a aparição de áreas sombreadas ao longo da interface fibra-matriz, o que indicaria formação de vazios, com exceção da pequena área pontual circulada. Na Figura 42.b ainda é possível observar as microfibrilas que compõem a estrutura dos feixes em bom estado, sem degradação estrutural, resultado dos tratamentos realizados de mercerização nas fibras e de substituição de 50% do cimento da matriz por metacaulim.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Verificou-se que o tratamento químico com NaOH em concentração de 10% por 1 hora utilizado nos feixes de fibras longas e nas fibras curtas da *Bambusa vulgaris* se mostrou satisfatoriamente eficaz, promoveu a remoção de boa parte dos constituintes indesejáveis, expondo as microfibrilas e conferindo melhor rugosidade.

O ensaio de termogravimetria mostrou estabilidade térmica das fibras da *Bambusa vulgaris* até aproximadamente a temperatura de 200 °C, após essa temperatura houve grande degradação até o ponto de cinzas à temperatura de 620 °C. Também mostrou que o tratamento de mercerização não influenciou no comportamento térmico das fibras tratadas, sendo similar às fibras naturais.

A massa específica considerada baixa de 1,4 g/cm³ da *Bambusa vulgaris* obtida com o picnômetro a gás hélio, em conjunto com a resistência à tração das fibras de 388 MPa obtida com o ensaio de resistência à tração direta, são ótimas propriedades físico-mecânicas, cuja razão entre elas é 4 vezes superior em relação ao aço, o que confirma o potencial das fibras de bambu no desenvolvimento de novos produtos para a construção civil.

O uso de aditivo superplastificante em teor de 2% promoveu trabalhabilidade adequada para moldagem dos compósitos com fibras curtas, aleatoriamente dispersas na matriz, enquanto para os compósitos de fibras longas, moldados em camadas, o teor de superplastificante ideal foi de 0,5%.

Os compósitos produzidos apresentaram satisfatórias características físicas como menor densidade, onde as matrizes com fibras longas chegaram a reduzir esse valor em 12,4% (CFL6) em relação à matriz sem fibras, entretanto, o reforço com fibras longas não gerou alterações significativas em relação às propriedades mecânicas. Em contrapartida, as placas reforçadas com fibras curtas elevaram a resistência à flexão de 4,81 MPa (CFC0) para 6,81 MPa (CFC2), equivalente a 41,6% de majoração, além de aumentarem também a tenacidade das mesmas. Tais propriedades representam as qualidades desejadas para os novos materiais da construção civil, onde procuram-se produtos cada vez mais leves e mais resistentes.

As imagens de MEV dos compósitos indicaram que houve boa compatibilização superficial entre as fibras da *Bambusa vulgaris* e a matriz cimentícia, fator imprescindível para a transmissão dos esforços da fase dispersante para o reforço. As fibras no interior dos compósitos não apresentaram degradação estrutural,

representando bom resultado dos tratamentos realizados de mercerização e substituição de 50% do cimento da matriz por metacaulim.

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos, mais pesquisas devem ser realizadas tanto para caracterização mais profunda dos compósitos, como ensaio de arrancamento e de envelhecimento, como para aprimorar suas propriedades físicas e mecânicas, que podem ser adquiridas com melhoria nas técnicas de moldagem e outros tratamentos nas fibras e na matriz.

É sugerido para projetos futuros, o estudo de procedimentos mais eficientes para obtenção das fibras longas de bambu, métodos de obtenção das fibras de celulose isoladas, separadas da matriz fortemente interligada de lignina e hemicelulose (estrutura do complexo de lignocarboidrato), responsável pela sustentação dos colmos. Essa forte ligação dificulta a separação mecânica dos feixes de fibras, onde parte do material acaba sendo descartado, devido a danos oriundos do método. Recomenda-se processos químicos que degradem a lignina e hemicelulose, sem afetar a celulose, e fibras longas com seções transversais menores sejam obtidas para aumentar a área superficial de contato com a matriz, assim, aumentando a transmissão dos esforços da fase dispersante para o reforço.

REFERÊNCIAS

ACHOUR, A. GHOMARI, F. BELAYACHI, N. Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 31, n. 17, p. 1938-1962, 2017.

AGUIAR, A. S. Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia,, 2016.

ALI, A. NG, W. K. ARIFIN, F. RASSIAH, K. OTHMAN, F. HAZIN, M. S. AHMAD, M. M. M. H. Development and Mechanical Characterization of Green Bamboo Composites. *International Conference on Engineering and Technology (IntCET 2017)* AIP Conf. Proc. 1930, 020012-1–020012-6, 2018.

ANJOS, M. a. S. Dos. GHAVAMI, K., & BARBOSA, N. P. (2003). Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 7(2), 346–349. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200027>

ASHIK, K. P. SHARMA, R. S. A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 3, 420-426, 2015.

AZZINI, A. SALGADO, A. L. B. Possibilidades agrícolas e industriais do bambu. *O Agrônômico*. Campinas, vol. 33, p.61-80, 1981.

BARBOSA, J. C. INO, A. Ligações em estruturas pré-fabricadas de bambu: sistematização das técnicas. In: NUTAU - Núcleo de Tecnologia Arquitetura e Urbanismo - Pré-moldados e habitação social, 1996.

BREBU, M.; VASILE, C. Thermal degradation of lignin- a review. *Cellulose Chemistry and Technology*, v. 44, n. 9, p. 353–363, 2010.

CAMPOS, R. F. OKUYAMA, K. K. WEIRICH NETO, P. H. FARIAS, D. P. ARRUA, M. E. P. Espécies exóticas de bambu no município de São Mateus do Sul, Paraná. *Cadernos de Agroecologia – ISSN 2236-7934 – V. 11, N. 2*, 2016.

CAVALCANTE, D.G. Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CECHIN, L. Análise da viabilidade de produção de painéis de cimento reforçados com biomassa vegetal e escória de alto forno. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CHAUHAN, S. S. AGGARWAL, P. VENKATESH, G. S. ABHILASH, R. M. Mechanical characterization, modelling and application design of bamboo- polypropylene composites. *Int J Plast Technol* 22(1):85–103, 2018.

CHEN, W. et al. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from four plant cellulose fibers using a chemical-ultrasonic process. *Cellulose*, v. 18, n. 2, p. 433–442, 2011.

CHRIST, R. Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental, 111, 2014.

CORREIA, V. da C. Produção de celulose nanofibrilada a partir da polpa organossolve de bambu para nanoreforço de compósitos cimentícios. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2015.

CORREIA, V. da C. SANTOS, S. F. SAVASTANO Jr. ,H. JOHN, V. M. Utilization of vegetal fibers for production of reinforced cementitious materials. *Rilem Technical Letters* 2: 145- 154, 2018.

COSTA, D. S., BANNA, W. R., COSTA, D. da S., & SOUZA, J. A. S. Laminados de matriz polimérica e fibras de bambu contínuas e alinhadas, 1–8, 2007a.

COSTA, D. S., BANNA, W. R., COSTA, D. da S., & SOUZA, J. A. S. Laminados híbridos de fibras de bambu e sisal contínuas e alinhadas : caracterização mecânica, 1–9, 2007b.

COUTINHO, I. L. Corte, tratamento e beneficiamento de diferentes espécies de bambu no distrito de cacaria – Piraí – Rio de Janeiro. Monografia, Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro, seropédica, 2017.

CULZONI, R. A. M. Caraterísticas dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto. Rio de Janeiro: PUC- Rio. 134 p. Dissertação Mestrado, 1965.

CZARNECKI, B.; DAY, R. L. Durability of high performance concrete in cold climate and exposure to deicing salts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS: Environment and loading, 6. Mexico. Proceedings... exico: erida Yucatan, 010. p. 8 -688, 2010.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON. p. 261-309, 2011.

DEPUYDT, D. E.C. SWEYGERS², N. APPELS, L. IVENS, J. VUURE, A. W. V. The effect of bamboo microstructure on the mechanical properties of bamboo fibre reinforced composites. 21st International Conference on Composite Materials Xi'an, 20-25th August 2017

DUNKELBERG, K. IL31 Bamboo: Bamboo as a building material. Institute of Lightweight Structures: Stuttgart, 4 ed., 1985.

EHRENBRING, H. Z., & TUTIKIAN, B. F. (2016). Concretos Reforçados Com Fibras Naturais E Fibras Recicladas. Retrieved from http://www.firs.institutoventuri.org.br/images/T066_concretos_reforçados_com_fibras_naturais_e_fibras_recicladas.pdf

FERREIRA, J. A., JÚNIOR, A. I. O., & SOUZA, J. R. P. de. Comparação das resistências mecânicas do compósito resina poliéster / fibra de coco e madeiras brasileiras de usos estruturais Comparison of mechanical resistances of composite polyester resin / coconut fiber and brazilian woods of structural uses. *Engevista*, 19, 1364–1375, 2017.

FILGUEIRAS, T. S. GONÇALVES, A. P. S. Bambus nativos no Brasil: Oportunidades e desafios para seu conhecimento. In: Seminário Nacional para Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento do Bambu – REDEBAMBU. Anais. Brasília, 2006.

GASSAN, J. A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*, v. 33, n. 3, p. 369-374, 2002.

GEHLEN, L. R. Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais - PIPE. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GHAVAMI, K. Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering. In: *Symposium Materials for Low Income Housing*, 3, 1989, Mexico City. *Symposium...Mexico: CIB/RILEM*. p.526-536, 1989.

GHAVAMI, K. Estruturas de concreto armadas com bambu. CECAB – Colóquio sobre estrutura de concreto armado e protendido. Departamento de Engenharia Civil. Vol. 1, p. 149-173, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 1990.

GHAVAMI, K. MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. doi:10.1590/S1415-43662005000100016, 2005.

GHAVAMI, K. RODRIGUES, C. de S. PACIORNIK, S. Bamboo: Functionally graded composite material. *Asian Journal of Civil Engineering*, Irã, vol. 4, n. 1, p. 1-10, 2003.

GOES, C. M. W. de, FONTANINI, P. S. P., PIMENTEL, L. L., & JACINTHO, A. E. P. G. de A. Análise Da Aplicação De Concreto Com Adição De Macrofibras Estruturais Sintéticas E Microfibras De Vidro Anti-Crack Ar Em Pisos. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 12(1), 40–53. <https://doi.org/10.5216/reec.v12i1.37400>, 2016.

GRAÇA, V. L. *Bambu: Técnicas para o cultivo e suas aplicações*. 2 ed. São Paulo: Ícone, 1988.

GRAM, H. E. Durability of natural fiber in concrete. Swamy RN, editor. *Natural fiber reinforced cement and concrete*. Glasgow: Blackie, p. 143 – 172, 1988.

JBALLI, S.; MIRAOU, I.; HASSIS, H. Long-unidirectional palm and sisal fibers reinforced composite: an experimental investigation. *Journal of Natural Fiber*, v. 14, n. 3, p. 368-378, 2016.

JACKSON, P. J. Portland Cement: classification and manufacture. In: HEWLETT, P. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. New York: Elsevier Science & Technology Books. p. 24-94, 2004.

JANSSEN, J. A. J. *Building with bamboo*. London: Intermediate Technology Publications, 1995.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. *Cement and concrete aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95-108, 1980.

KHALIL, H. P. S. A. BHAT, A. H. YUSRA, A. F. I. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*, v. 87, n. 2, p. 963–979, jan. 2012.

LENGEN, J. V. *Manual do arquiteto descalço*. 4 ed. Rio de Janeiro: Livraria do Arquiteto, 2004.

LIESE, W.; *Research on Bamboo*. *Wood Science and Technology*, 21(3). 1987.

LIMA, A. G. T. Caracterização Do Isolamento Acústico De Polímeros Reciclados Adicionados De Fibras De Bambu Utilizando Análise Do Coeficiente De Absorção Sonora Em Tubos De Impedância, 2016.

LIMA, D. M., PAULA, J. De, MARIA, J., & MARIA, J. Encontros Universitários da UFC 2016. *Encontros Universitários Da UFC, 1*, 2550, 2016.

LÓPEZ, O. H. Bamboo the gift of the gods. 1 ed. Bogotá, Colômbia: D´VINNI LTDA, 2003.

LOUREDO, F. M. DA COSTA, R. de S. M. Análise de Políticas Públicas: Reflexões sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu. V encontro brasileiro de administração pública. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2018.

LUZ, A. B., CAMPOS, A.R., CARVALHO, E.A. e BERTOLINO, L.C., Caulim. In Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações. Ed. Luz, A. B. e LINS, F.A.F. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, pp.231-262, 2005.

MANALO, A. C.; WANI, E.; ZUKARNAIN, N. A.; KARUNASENA, W.; LAU, K.; Effects of alkali treatment and elevated temperature on the mechanical properties of bamboo fibre–polyester composites. *Composites Part B: Engineering*. doi:10.1016/j.compositesb.2015.05.033, 2015.

MAZZOLI, A. MONOSI, S. PLESCIA, E. S. Evaluation of the early-age-shrinkage of fiber reinforced concrete (FRC) using image analysis methods. *Construction and Building Materials* 101, 596 – 601, 2015.

MEDINA, E. A. Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MELO, S. L. S. Investigação das propriedades mecânicas e adesão interfacial dos compósitos de polipropileno virgem e reciclado reforçados com fibras e microfibras de bambu. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2016.

MELO FILHO, J. de A. Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

MULINARI, D. R.; BAPTISTA, C. A. R. P.; SOUZA, J. V. C.; VOORWALD, H. J. C.; Mechanical properties of coconut fibers reinforced polyester composites. *Procedia Engineering*, 10. doi:10.1016/j.proeng.2011.04.343, 2011.

NAÇÕES UNIDAS. The Use of Bamboo and Reeds in Building Construction. Department of Economic and Social Affairs. New York: United Nations, 1972.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C.; *Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia*, 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2006.

OLIVEIRA, L. F. A. *Conhecendo bambus e suas potencialidades para uso na construção civil. Monografia (Especialização) - Curso de Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia UFMG, Belo Horizonte, 2013.*

ONUAGULUCHI, O. BANTHIA, N. Plant-based natural fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 2016.

OUTA, R. CHAVARETTE, F. R. LOUZADA, M. J. Q. Resistência mecânica da fibra vegetal mercerizada da cana de açúcar e bambu. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering v. 10(3): 288-304, 2016.*

OVIEDO, M. A. S.; Lemos, C; Carvalho, F. P.; *Processo de granulação de poliolefina, resina de poliolefina, fibra de poliolefina, uso da fibra de poliolefina e compósito cimentício. Patente. 2013.*

PEIXOTO, L. K. *Sistema Construtivo em Bambu Laminado Colado: Proposição e Ensaio do Desempenho Estrutural de uma Treliça Plana tipo Warren.* <https://doi.org/616.89-008.47:616->, 2008.

PENELLUM, M. SHARMA, B. SHAH, D. U. FOSTER, R. M. RAMAGE, M. H. Relationship of structure and stiffness in laminated bamboo composites. *Construction and Building Materials 165 (2018) 241–246*

POSADA, J. C. JARAMILLO, L. Y. CADENA, E. M. GARCÍA, L. A. Bio-based composites from agricultural wastes: Polylactic acid and bamboo *Guadua angustifolia*. *Journal of Composite Materials, Vol. 50(23), 2016.*

QUININO, U. C. M. *Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adição híbridas de fibras. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2015.*

RIBEIRO, A. dos S. BRONDANI, G. E. TORMEN, G. C. R. DE FIGUEIREDO, A. J. R. *Cultivo in vitro de bambu em diferentes sistemas de propagação. Nativa, Sinop, v.4, n.1, p.15-18, 2016.*

RILEM THECNICAL COMMITIEE 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. *Matériaux et Constructions*, v.17, n.102, 1984.

ROGRIGUES, A. R. M. DA SILVA, N. Q. A. TEJAS, C. T. O desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu em Rondônia: A formação de uma cadeia produtiva alternativa para o desenvolvimento regional sustentável. Encontro internacional sobre gestão e meio ambiente, Universidade Federal de Rondônia. Rondônia, 2015.

RYDHOLM, S. A. *Pulping processes*. London: Interscience Publishers, John Wiley and Sons, Inc. 1269 p, 1965.

SALES, H. A. Desempenho mecânico e durabilidade de placas planas à base de óxido de magnésio. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, 2018.

SANAL, I. VERMA, D. *Construction Materials Reinforced with Natural Products*, (December), 2017.

SAVASTANO Jr. Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. 152 f. Tese (Livre-Docência em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

SHAH, D. U. BOCK, M. C. D. MULLIGAN, H. RAMAGE, M. H. Thermal conductivity of engineered bamboo composites. *J Mater Sci* 51:2991–3002, 2016.

SILVA, K. D. S. da COSTA, F. M. LOPES, R. K. RIBEIRO, L. M B. PIOVESAN, J. C. Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto sustentável. *Diálogos: Economia e Sociedade*, Porto Velho, v. 2, n. 1, p. 176 – 190, 2018

SILVA, R. M., ALVIM, R. de C. DOMINGUEZ, D. S. Estudo da resistência mecânica de um compósito cimentício leve reforçado com fibras de piaçava. *Revista Educação, Tecnologia E Cultura - E.T.C.*, 12(12), 25–32, 2016.

SOUSA, A. B. F. MELO, S. L. S. AMORIM, L. DE DEUS, E. P. Compósitos reforçados com fibras longas de bambu: modificação superficial e análise mecânica. Congresso anual da ABM, São Paulo, 3ª edição, vol. 72, num. 1, 2017.

SOUZA, A. M. de. Os diversos usos do bambu na construção civil. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Campo Mourão, 2014.

SMITH, D. M. - Method of Determining Specific Gravity of Small Wood Chips. U. S. Forest Products Laboratory. Report n.o 2209. 10 p. 1961.

SMOOK, G. A. Handbook for pulp and paper technologists. Joint Committee of the Paper Industry, Canadá. 370 p, 1989.

STEFANIDIS, S. D. et al. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 105, p. 143–150, 2014.

TIBURTINO, R.F. PAES, J. B. VIDAURRE, G. B. ARANTES, M. D. C. ROSA, F. A. Influência do diafragma no tratamento preservativo de duas espécies de bambu por substituição de seiva. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 925-938, 2016.

TOLEDO FILHO, R. D. SCRIVENER, K. ENGLAND, G. L. GHAVAMI, K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites. Cement and Concrete Composites 22, 127 – 143, 2000.

VIERIA, A. J. T., MOURA, C. R., HERPICH, M. R., CAMPOS, N., & CAMPOS, G. D. L. Aplicação da Fibra de Bambu aos Sistemas Industrializados para Desenvolvimento de Placas de Concreto. *Veredas*, 9, 92–106, 2016.

WAHAB, R.; MUSTAFA, M. T.; RAHMAN, S.; SALAM, M. A.; SULAIMAN, O.; SUDIN, M. RASAT, M. S. M.; Relationship between physical, anatomical and strength properties of 3-year-old cultivated tropical bamboo *gigantochloa scortechinii*. Journal of Agricultural and Biological Science, 7(10). doi:1990-6145, 2012.

WEBER, A. M. Viabilidade técnica da utilização de fibra de curauá (*ananas erectifolius*) como reforço em compósitos cimentícios laminados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

YANG, X. WANG, K. TIAN, G. LIU, X. YANG, S. Evaluation of chemical treatments to tensile properties of cellulosic bamboo fibers. European Journal of Wood and Wood Products, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1303-2>

YOUSSEFIAN, S.; RAHBAR, N.; Molecular Origin of Strength and Stiffness in Bamboo Fibrils. Scientific Reports. doi:10.1038/srep11116, 2015.

YU, J. et al. Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. Fuel, v. 191, p. 140–149, mar. 2017.

ZHAO, C.; JIANG, E.; CHEN, A. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. Journal of the Energy Institute, v. 90, n. 6, p. 902–913, 2017.

Normas:

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 593 – Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 618 – Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 948 – Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1557 – Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão, 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 – Materiais Pozolânicos - Requisitos, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498 – Placa de Fibrocimento sem Amianto – Requisitos e Métodos de Ensaio, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 – Agregado Miúdo – Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica, 2001.