



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E**  
**TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA – CITA**

**PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE NANOFIBRAS**  
**CELULÓSICAS DE TABOCA (*Guadua spp*) PARA**  
**REFORÇO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**CARLOS DRUMOND DO NASCIMENTO MORAIS**

RIO BRANCO, AC  
Julho / 2021

**CARLOS DRUMOND DO NASCIMENTO MORAIS**

**PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE NANOFIBRAS  
CELULÓSICAS DE TABOCA (*Guadua spp*) PARA  
REFORÇO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências e Inovação Tecnológica**.

**Orientador: Dsc. ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ**

**Co-orientador: Dsc. JOSÉ ROBERTO DE LIMA MURAD**

RIO BRANCO, AC  
Julho / 2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E**  
**TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA – CITA**

**PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE NANOFIBRAS CELULÓSICAS**  
**DE TABOCA (*Guadua spp*) PARA REFORÇO DE COMPÓSITOS**  
**CIMENTÍCIOS**

**CARLOS DRUMOND DO NASCIMENTO MORAIS**

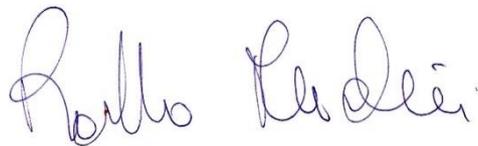
DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28/07/2021



---

**ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE**



---

**ROBERTO MARCHIORI**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA**



---

**JUDES GONÇALVES DOS SANTOS**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA**

Ao meu pai José Augusto, que sempre me ensinou que a Educação é o melhor caminho, e que agora descansa no Reino de Deus. À minha mãe, Maria do Socorro, mulher guerreira e mãe amorosa. À minha esposa Nayara, minhas filhas Maria Clara e Maitê.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente ao meu amigo e companheiro de pesquisa e de Rede Federal, Marcelo Ramon, pela sua enorme contribuição na pesquisa. Ao meu orientador Dr. Anselmo Rodriguez, pelo apoio na construção deste trabalho e confiança em ceder o uso do Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da UFAC. Ao meu Co-orientador Dr. José Roberto de Lima Murad, pela coleta dos espécimes e ainda enorme contribuição teórica sobre o bambu amazônico, bem como nos ensaios realizados.

A todos os docentes do programa, pelo excelente compartilhamento de conhecimento ao longo do curso.

A todas instituições que colaboraram com minha pesquisa com a realização das análises que necessitei.

Também ao aluno do programa PPG-CITA, Marcelo Moraes, pela parceria e contribuições na pesquisa.

À CAPES e UFAC pela oportunidade de cursar esse programa de mestrado, como sempre público, gratuito e de qualidade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia-IFRO, por ter me concedido a licença para cursar o mestrado, e ainda aos meus colegas docentes que se prontificaram a assumir minha carga horária até que houvesse substituto.

“Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.”  
Dave Weinbaun

## RESUMO

Neste trabalho produzimos nanofibras celulósicas de bambu e avaliamos o efeito da sua adição nas propriedades mecânicas e físicas da argamassa. Foram caracterizadas as propriedades química e morfológicamente as nanofibras celulósicas, produzimos amostras de argamassa com diferentes teores de adição de nanofibras e comparamos os resultados dos ensaios físicos e mecânicos dos diferentes traços estudados. O bambu nativo foi triturado e submetido a dois tipos de polpação celulósica, após isso foi realizado o branqueamento da polpa. A polpa foi caracterizada pelas análises de teor de celulose, espectroscopia de infravermelho-FTIR, difração de raio X-DRX, termogravimetria e microscopia eletrônica de transmissão-MET. Foram moldadas amostras de argamassa com 6 diferentes teores de adição de nanofibras, determinando sua absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e resistência à tração. As análises químicas definiram o melhor método de polpação e branqueamento, com maior teor final de celulose e a microscopia eletrônica de transmissão confirmou as dimensões nanométricas das fibras. Os resultados mostraram boas características da fibra de bambu para uso como reforço de compósitos cimentícios, corroborado pelos testes físicos e químicos, demonstrando ser a nanofibra celulósica de bambu um bom elemento de reforço para compósitos cimentícios. Em base de nossos resultados podemos afirmar que nosso material nanoestruturado tem grande potencial para ser aplicado na engenharia civil.

**Palavras-chave:** Nanofibras de bambu; argamassa; Cimento Portland; Fibras para reforço de materiais de construção.

## ABSTRACT

In this work we produce bamboo cellulosic nanofibers and evaluate the effect of its addition on the mechanical and physical properties of mortar. The chemical and morphological properties of cellulosic nanofibers were characterized, mortar samples with different levels of addition of nanofibers were characterized and we compared the results of the physical and mechanical tests of the different traits studied. Native bamboo was crushed and submitted to two types of cellulosic pulping, after which pulp bleaching was performed. The pulp was characterized by analysis of cellulose content, infrared-FTIR spectroscopy, X-XRD diffraction, thermogravimetry and transmission-MET electron microscopy. Mortar samples were molded with 6 different levels of addition of nanofibers, determining their water absorption, void index, specific mass, compressive strength and tensile strength. The chemical analyses defined the best method of pulping and bleaching, with higher final cellulose content and transmission electron microscopy confirmed the nanometric dimensions of the fibers. The results showed good characteristics of bamboo fiber for use as reinforcement of cementitious composites, corroborated by physical and chemical tests, showing that bamboo cellulosic nanofiber is a good reinforcing element for cementitious composites. Based on our results we can affirm that our nanostructured material has great potential to be applied in civil engineering.

**Keywords:** Bamboo nanofibers; mortar; Portland Cement; Fibers for reinforcement of building materials.

## LISTA DE FIGURAS

		<b>Pág</b>
<b>Figura 01</b>	Cimento Portland	19
<b>Figura 02</b>	Agregado miúdo (areia)	20
<b>Figura 03</b>	Agregado graúdo (brita)	20
<b>Figura 04</b>	Pasta de cimento	21
<b>Figura 05</b>	Argamassa	21
<b>Figura 06</b>	Concreto	21
<b>Figura 07</b>	Clínquer	23
<b>Figura 08</b>	Principais componentes da fibra vegetal	28
<b>Figura 09</b>	Estrutura molecular da celulose	29
<b>Figura 10</b>	Estrutura molecular dos álcoois precursores da lignina	30
<b>Figura 11</b>	Carboidratos formadores da hemicelulose	31
<b>Figura 12</b>	Efeito do pré-tratamento na estrutura da fibra vegetal.	33
<b>Figura 13</b>	Interior de uma floresta com o sub-bosque dominado pelo bambu ( <i>Guadua</i> spp.) no Parque Estadual Chandless, Acre.	35
<b>Figura 14</b>	Localização e distribuição das florestas com bambu (manchas escuras) no sudoeste da Amazônia.	35
<b>Figura 15</b>	Bambu no local de origem/Detalhe das amostras	39
<b>Figura 16</b>	Moinho de facas utilizado para moagem dos cavacos de bambu	40
<b>Figura 17</b>	Espectrofotômetro de radiação infravermelha por absorção	41
<b>Figura 18</b>	Difratômetro de Raios X	42
<b>Figura 19</b>	Equipamento de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)/Análise Térmica Diferencial (DTA).	42
<b>Figura 20</b>	Microscópio Eletrônico de Transmissão-MET	43
<b>Figura 21</b>	Maceração das fibras e diluição na água de amassamento.	47
<b>Figura 22</b>	Preparo dos moldes para confecção dos corpos de prova.	46
<b>Figura 23</b>	Corpos de prova em cura úmida no tanque de água.	46
<b>Figura 24</b>	Teste de compressão axial das amostras de argamassa.	48
<b>Figura 25</b>	Teste de compressão diametral das amostras de argamassa.	49
<b>Figura 26</b>	Esquema do delineamento estatístico	50
<b>Figura 27</b>	Cavacos de bambu sendo triturados no moinho/Bambu após triturado	51
<b>Figura 28</b>	Deslignificação da polpa de bambu utilizando NaOH/Aspecto após deslignificação	52
<b>Figura 29</b>	Branqueamento da polpa de bambu com H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e NaOH/Aspecto após 01 branqueamento	52
<b>Figura 30</b>	Aspecto após 02 branqueamentos.	53
<b>Figura 31</b>	Aspecto após 03 branqueamentos.	53
<b>Figura 32</b>	Gráficos de FTIR para as amostras de polpa celulósicas obtidas do bambu.	55

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 33</b>	Difratograma de Raios-X do bambu triturado.	56
<b>Figura 34</b>	Difratograma de Raios-X da polpa de bambu lavada 4 vezes (a); DRX da polpa lava 4 vezes e branqueada 1 vez (b); DRX da polpa lavada 4 vezes e branqueada 2 vezes (c) e DRX da polpa lavada 4 vezes e branqueada 3 vezes (d).	57
<b>Figura 35</b>	Curvas de TGA.	58
<b>Figura 36</b>	Imagens do MET das nanofibras celulósicas	59
<b>Figura 37</b>	Curva granulométrica da areia do Rio Acre (Amostra média).	60
<b>Figura 38</b>	Pesagem dos materiais componentes da argamassa.	61
<b>Figura 39</b>	Balança para pesagem da massa seca e saturada das amostras de argamassa.	62
<b>Figura 40</b>	Secagem das amostras de argamassa em estufa.	62
<b>Figura 41</b>	Pesagem das amostras de argamassa submersas.	63
<b>Figura 42</b>	Médias de absorção de água para os diferentes traços testados.	64
<b>Figura 43</b>	Médias de Índice de Vazios para os diferentes traços testados.	65
<b>Figura 44</b>	Médias de Massa Específica para os diferentes traços testados.	66
<b>Figura 45</b>	Médias de Resistência à compressão para os diferentes traços testados.	68
<b>Figura 46</b>	Médias de Resistência à Tração para os diferentes traços testados.	69

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabela 01</b> Tipos de cimento Portland disponíveis no Brasil	24
<b>Tabela 02</b> Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais e sintéticas.	27
<b>Tabela 03</b> Composição química de algumas fibras vegetais.	32
<b>Tabela 04</b> Resumo dos métodos de polpação utilizados	40
<b>Tabela 05</b> Quantidade de materiais para confecção da argamassa	44
<b>Tabela 06</b> Resultado da análise do teor de celulose a partir do método FDN/FDA	54
<b>Tabela 07</b> Boletim de ensaios com o cimento CP IV – 32.	59
<b>Tabela 08</b> Granulometria da areia do Rio Acre (Amostra média).	59
<b>Tabela 09</b> Adição de nanofibras em cada tipo de traço.	61
<b>Tabela 10</b> Quantidade de materiais por amassamento	61
<b>Tabela 11</b> Absorção de água das amostras a 28 dias de cura.	63
<b>Tabela 12</b> Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Absorção de água	64
<b>Tabela 13</b> Índice de vazios das amostras a 28 dias de cura.	64
<b>Tabela 14</b> Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Índice de Vazios	65
<b>Tabela 15</b> Massa Específica das amostras a 28 dias de cura.	66
<b>Tabela 16</b> Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Massa específica	67
<b>Tabela 17</b> Resistência à compressão das amostras a 28 dias de cura.	67
<b>Tabela 18</b> Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Resistência à compressão	68
<b>Tabela 19</b> Resistência à tração das amostras a 28 dias de cura.	69
<b>Tabela 20</b> Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Resistência à tração	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

PVA – Acetato de polivinila (polímero)  
CO<sub>2</sub> – Gás carbônico  
kg/m<sup>3</sup> - Quilogramas por metro cúbico  
% - Porcento  
MPa – Mega Pascal  
GPa – Giga Pascal  
β – Beta  
α - Alfa  
°N -Graus norte (latitude)  
°S – Graus Sul (Latitude)  
m – Metro  
km<sup>2</sup> - Quilômetros quadrado  
ha – Hectare  
nm – Nanômetro  
10° 5'2.87"S – Graus, minutos e segundos – Sul – Latitude  
67°53'53.59"O - Graus, minutos e segundos – Oeste – Longitude  
cm – centímetro  
UFAC – Universidade Federal do Acre  
NaOH – Hidróxido de Sódio  
g – Gramas  
mL – Mililitros  
h – Horas  
H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> - Peróxido de Hidrogênio  
°C – Graus Celsius  
m/m – Massa/massa  
v/v – Volume/volume  
FDN/FDA – Fibras em detergente neutro/Fibras em detergente ácido  
KBr – Brometo de Potássio  
kV – Quilovolt  
mA – Mili Ampére  
deg/min – graus por minuto  
mL/min – Mililitros por minuto  
mg – Miligrama  
rpm – rotações por minuto  
s – Segundos  
T- Tonelada  
mm - Milímetros

## LISTA DE EQUAÇÕES

		<b>Pág.</b>
<b>Equação 01</b>	Cálculo da absorção de água da argamassa endurecida	47
<b>Equação 02</b>	Cálculo do índice de vazios da argamassa endurecida	47
<b>Equação 03</b>	Cálculo da massa específica da argamassa endurecida	48
<b>Equação 04</b>	Cálculo da resistência à compressão aos 28 dias	49
<b>Equação 05</b>	Cálculo da resistência à tração indireta por compressão diametral aos 28 dias	49
<b>Equação 06</b>	Cálculo da resistência à tração na flexão aos 28 dias	70

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1. Compósitos cimentícios</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.1. Conceituação e tipos de compósitos cimentícios</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.2. Materiais constituintes da argamassa</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2.1. Cimento Portland</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2.1.2. Definição</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2.1.3. Composição</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2.1.4. Classificação</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.2.2. Agregados</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.2.2.1. Definição</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.2.2.2. Classificação</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.2.3. Água</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2. Fibras para reforço de compósitos</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.1. Vantagens da utilização de fibras vegetais em relação às sintéticas</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2. Composição das fibras celulósicas</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.2.1. Celulose</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.2.2. Lignina</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2.2.3. Hemicelulose</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.2.4. Holocelulose</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.2.5. Extrativos</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3. Modificações na matriz cimentícia para compatibilização química com as fibras vegetais</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.1. Pré-tratamento das fibras celulósicas</b> .....	<b>33</b>
<b>2.4. O bambu <i>Guadua spp</i> como fonte de fibras celulósicas</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5. Adição de nanofibras celulósicas nos compósitos cimentícios</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5.1. Nanotecnologia</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5.2. Tipos de nanopartículas celulósicas</b> .....	<b>37</b>
<b>2.5.3. Métodos de obtenção de nanofibras celulósicas</b> .....	<b>37</b>
<b>2.5.4. Vantagens da utilização das nanofibras</b> .....	<b>38</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1. Coleta e produção da polpa celulósica do bambu</b> .....	<b>39</b>

3.2	Caracterização morfológica e química das polpas .....	41
3.2.1	Determinação da composição química da polpa .....	41
3.2.1.1	Análise do teor de celulose .....	41
3.2.1.2	Determinação dos grupos funcionais e confirmação da redução do teor de lignina e hemicelulose por meio da espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier .....	41
3.2.1.3	Determinação da cristalinidade - DRX .....	42
3.2.1.4	Análise termogravimétrica - TGA.....	42
3.2.1.5	Caracterização morfológica da polpa celulósica .....	43
3.3	Confeção dos corpos de prova de argamassa .....	44
3.3.1	Cimento Portland .....	44
3.3.2	Agregado Miúdo .....	44
3.3.3	Adição de nanofibras de bambu .....	44
3.4	Dosagem e mistura da argamassa .....	44
3.5	Moldagem dos corpos de prova .....	45
3.6	Cura e desmoldagem dos corpos de prova.....	46
3.7	Testes Físicos.....	47
3.7.1	Procedimento .....	47
3.7.2	Absorção de água.....	47
3.8	Testes Mecânicos .....	48
3.8.1	Equipamento utilizado .....	48
3.8.2	Preparação dos corpos de prova.....	48
3.8.3	Resistência à compressão .....	49
3.8.4	Resistência à tração .....	49
3.9	Análise estatística dos dados .....	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1	Produção da polpa celulósica do bambu.....	51
4.2	Caracterização morfológica e química das polpas .....	54
4.2.1	Determinação da composição química da polpa .....	54
4.2.1.1	Análise do teor de celulose .....	54
4.2.1.2	Determinação dos grupos funcionais e confirmação da redução do teor de lignina e hemicelulose por meio da espectroscopia Infravermelho com Transformada de Fourier .....	55
4.2.1.3	Determinação da cristalinidade – DRX.....	57
4.2.1.4	Análise termogravimétrica – TGA .....	59

4.2.2	Caracterização morfológica da polpa celulósica .....	59
4.3.	Confeção dos corpos de prova de argamassa.....	60
4.3.1.	Cimento Portland .....	60
4.3.2.	Agregado Miúdo .....	60
4.3.3.	Adição de nanofibras de bambu .....	61
4.4.	Dosagem e mistura da argamassa .....	62
4.5.	Testes Físicos.....	63
4.7.1.	Absorção de água.....	64
4.7.2.	Índice de vazios .....	65
4.7.3.	Massa específica .....	67
4.8.	Testes Mecânicos .....	68
4.8.1.	Equipamento utilizado .....	68
4.8.2.	Resistência à compressão .....	68
4.8.3.	Resistência à tração .....	70
5.	CONCLUSÕES .....	72
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

# 1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos produtos industrializados tinha como matéria prima recursos naturais, perdurando assim até o século 19, e desde então, até meados da década de 70, o petróleo e seus derivados se tornaram protagonistas como matéria prima para tais produtos. Atualmente, o esforço tem se concentrado em substituir o petróleo e seus derivados por produtos naturais e sustentáveis (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017).

Entre os produtos industrializados, a indústria da construção civil utiliza as fibras para reforço dos materiais de construção. Existem variados tipos de fibras tradicionalmente utilizados para reforço de compósitos cimentícios, como fibras de aço, fibras minerais como o asbesto, fibras de PVA, fibras de polipropileno, fibras poliméricas, existindo variados estudos sobre estas adições (SIVAKUMAR & SANTHANA, 2007; QIAN & STROEVEN, 2000; ABU-LEBDEH et al., 2012; PACHECO-TORGAL & JALALI, 2011; CAMPELO et al., 2016).

Como alternativa aos materiais sintéticos, a indústria da construção civil tem investido na utilização de produtos renováveis como matéria prima, em substituição aos produtos tradicionais oriundos de materiais não renováveis, para tornar seus processos de produção sustentáveis. As fibras vegetais fazem parte desse grupo de produtos renováveis, utilizadas como reforço de materiais de construção, como os compósitos cimentícios (PACHECO-TORGAL & JALALI, 2011).

A importância de novas alternativas sustentáveis de fibras de reforço para esses materiais se dá ao fato de que a indústria da construção civil é a que mais produz no mundo inteiro (SHAMIM et al., 2018), sendo o concreto seu insumo mais utilizado, tendo este como características mecânicas a alta resistência à compressão e baixa resistência à tração (WAHYUNI et al., 2014). A adição de fibras tem se tornado cada vez mais usada para corrigir a deficiência dos compósitos cimentícios quanto à baixa resistência à tração (FERRO, et al., 2014; PACHECO-TORGAL & JALALI, 2011).

As fibras vegetais, tais como as sintéticas, são utilizadas com o objetivo de melhorar as propriedades de um determinado compósito, principalmente as mecânicas (BILCATI, 2015). As adições de fibras em compósitos frágeis aumentam seu módulo de ruptura e resistência à tração significativamente, diminuindo a fissuração da matriz reforçada pelas fibras e otimizando seu uso como materiais de construção (AGOPYAN et al., 2005; LOPES et al., 2010).

Diante da problemática em se produzirem materiais mais sustentáveis para a construção civil e o apelo ambiental em se utilizar recursos mais renováveis em detrimento aos materiais sintéticos derivados do petróleo, justificou-se a pesquisa utilizando nanofibras de bambu para reforço em compósitos cimentícios, sendo a escala nanométrica utilizada pois a literatura científica mostram resultados semelhantes às fibras macrométricas, porém utilizando menor quantidade.

Portanto o objetivo geral deste trabalho foi produzir as nanofibras celulósicas de bambu e avaliar o efeito da sua adição na argamassa de Cimento Portland e areia, nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração e físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica do compósito. Produzimos e caracterizamos por análises físico-química as nanofibras celulósicas obtidas do bambu *Guadua spp* e após isso confeccionar corpos de prova de argamassa com diferentes teores de adição de nanofibras, e comparamos os resultados dos testes físicos e mecânicos entre si, definindo o melhor teor de adição de nanofibras.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Compósitos cimentícios

#### 2.1.1. Conceituação e tipos de compósitos cimentícios

Um material compósito possui várias fases, sendo cada elemento constituinte devidamente proporcionado nessa mistura, visando obter determinadas propriedades (VENTURA, 2009). A maioria dos materiais compósitos são formados por apenas duas fases: a matriz, que é a fase contínua e que abrange a outra fase, denominada fase dispersiva (FREITAS et al., 2009).

As propriedades dos materiais compósitos estão intrinsecamente atreladas com as propriedades de seus elementos constituintes, quantidade de cada um, morfologia de cada um, distribuição (CALLISTER, 1994).

Os compósitos cimentícios podem ser compostos por cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo, podendo ainda serem utilizadas adições e aditivos químicos, com a finalidade de otimizar suas propriedades físicas e mecânicas, de acordo com o tipo de uso pretendido (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

Alguns exemplos de adições são a cinza volante, a pozolana e a sílica ativa (FILHO et al., 2017).

Os compósitos podem ainda ter em sua composição, elementos como pigmentos, fibras (objeto deste trabalho), tipos de agregados especiais, entre outros (BASTOS, 2014).



**Figura 01** – Cimento Portland.

Fonte: BASTOS, 2014.



**Figura 02** – Agregado miúdo (areia).

Fonte: BASTOS, 2014.



**Figura 03** – Agregado graúdo (brita).

Fonte: BASTOS, 2014.

Combinando os elementos constituintes de um compósito cimentício, temos a pasta que consiste no cimento misturado com água, além da argamassa, que é a pasta misturada com o agregado miúdo (areia), e o concreto, que é a argamassa misturada com o agregado graúdo (brita) (PFEIL, 1985).

A pasta tem função de preencher os espaços vazios entre os grãos dos agregados e quando a mesma tem suas reações químicas decorrentes da hidratação do cimento, ela endurece, ganha resistência e forma assim, em conjunto com os agregados, um material sólido (PFEIL, 1985)



**Figura 04** – Pasta de cimento.

Fonte: BASTOS, 2014.



**Figura 05** – Argamassa.

Fonte: BASTOS, 2014.



**Figura 06** – Concreto.

Fonte: BASTOS, 2014.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a argamassa de cimento Portland com areia para verificar a influência da adição das nanofibras celulósicas de bambu nas suas propriedades físicas e mecânicas.

## **2.1.2. Materiais constituintes da argamassa**

### **2.1.2.1. Cimento Portland**

O cimento Portland foi desenvolvido na Inglaterra no ano de 1824, tendo sua produção em escala industrial a partir de 1850 (BASTOS, 2014), sendo o tipo de cimento mais utilizado na construção civil, devendo seu nome à ilha britânica de Portland, onde foi criado (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

#### **2.1.2.1.2. Definição**

O cimento é um material fino, em pó, que adquire propriedades aglomerantes quando submetido ao processo químico de hidratação, onde os componentes do cimento e da água reagem e proporcionam seu endurecimento (MEHTA & MONTEIRO, 2008) e após, não volta mais às suas características iniciais se submetido à ação da água (ABCP, 2002).

#### **2.1.2.1.3. Composição**

O cimento Portland tem como principal constituinte o clínquer, que é um material produzido a partir do aquecimento a cerca de 1450 °C de uma mistura de rocha calcária moída e argila, e ao resfriar, formam-se as pelotas de clínquer (COSTA, et al., 2013).

Após o clínquer ser finamente moído, é adicionado 3 a 5% de sulfato de cálcio (cal), visando ajustar o tempo de pega (início da hidratação química do cimento), e assim é obtido o cimento Portland. (BATTAGIN, 2011).

Os principais compostos químicos constituintes do cimento Portland são a Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a Cal ( $\text{CaO}$ ), a Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Magnésia ( $\text{MgO}$ ), Anidrido Sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), além de outros compostos presentes em menores quantidades, considerados como impurezas, óxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ), Óxido de Sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e Óxido de Potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) (BAUER, 2000).



**Figura 07** – Clínquer

Fonte: BASTOS, 2014.

Outros materiais podem ser adicionados à mistura, visando modificar as propriedades a serem oferecidas pelo cimento produzido, são as adições e dão origem aos Cimentos Portland Compostos (BATTAGIN, 2011; CINCOTTO, 2011).

Dentre os tipos de adições, é possível citar o gesso, o filler calcário - material finamente moído, sem função química, apenas visa melhorar a granulometria do cimento (ISAIA, 2011), a escória de alto forno - resíduo proveniente de indústrias siderúrgicas (DAL MOLIN, 2011; MEHTA & MONTEIRO, 2008) e as pozolanas e materiais carbonáticos (proporcionam melhor trabalhabilidade e menor fissuração em concretos e argamassas).

#### **2.1.2.1.4. Classificação**

Os tipos de cimento Portland utilizados no Brasil estão listados na tabela 01. Dentre eles o uso de certos tipos é mais frequente dependendo da região do país, levando-se em consideração a disponibilidade comercial. Alguns tem uso bem definidos como o CPV-ARI (Alta resistência inicial), são amplamente utilizados pelas fábricas de peças pré-moldadas em concreto e argamassa, devido a necessidade de rotatividade das fôrmas, ganhando resistência rapidamente para sua desforma (BASTOS, 2014).

**Tabela 01** – Tipos de cimento Portland disponíveis no Brasil.

<b>Nome Técnico</b>	<b>Sigla</b>
Comum	CP I
Comum com adição	CP I – S
Composto com pozolana	CP II-Z
Composto com escória	CP II-E
Composto com fíler	CP II-F
Pozolânico	CP IV
Alta resistência inicial	CP V-ARI
Branco estrutural	CPB
Alto forno	CP III

Fontes: ABCP, 2002; BATTAGIN, 2011.

## 2.1.2.2. Agregados

### 2.1.2.2.1. Definição

Os agregados podem ser definidos como materiais granulosos e inertes quimicamente, que fazem parte da constituição das argamassas e concretos, possuindo dimensões e propriedades adequadas para sua aplicação na construção civil. (BAUER, 2000).

### 2.1.2.2.2 Classificação

Os agregados podem ser classificados quanto a origem de sua obtenção, massa específica e granulometria, sendo detalhados a seguir: (BAUER, 2000; PETRUCCI, 1998; BASTOS, 2014; SBRIGHI NETO, 2011).

#### **Quanto à origem:**

**Naturais:** São ditos agregados naturais aqueles cuja condição de uso é encontrada prontamente na natureza, como cascalho, seixo rolado, areia de rio e de jazida, entre outros (BAUER, 2000; PETRUCCI, 1998; BASTOS, 2014; SBRIGHI NETO, 2011).

**Britados:** São ditos agregados britados aqueles que passaram por britagem para modificação de sua granulometria, como brita, pedregulho britado, entre outros (BAUER, 2000; PETRUCCI, 1998; BASTOS, 2014; SBRIGHI NETO, 2011).

**Artificiais:** São os agregados obtidos por meio de processos industriais de produção, como a argila expandida, vermiculita, entre outros (BAUER, 2000; PETRUCCI, 1998; BASTOS, 2014; SBRIGHI NETO, 2011).

**Reciclados:** podem ser resíduos industriais que possuam granulometria e compatibilidade química adequados à utilização como agregado, ou ainda resultante do processamento de entulhos de construção (BAUER, 2000; PETRUCCI, 1998; BASTOS, 2014; SBRIGHI NETO, 2011).

**Quanto à massa específica:**

**Agregados leves:** São os agregados que possuem massa específica menor que 1800 Kg/m<sup>3</sup> (ABNT, 2009), podendo produzir concretos leves para usos especiais (ROSSIGNOLO & AGNESINI, 2011).

**Agregados densos ou pesados:** São agregados que possuem massa específica maior ou igual a 3000 Kg/m<sup>3</sup> (ABNT, 2006), podendo serem utilizados com fins específicos de concretos especiais pesados (REPETTE, 2011).

**Quanto à granulometria:**

**Agregados miúdos:** São chamados agregados miúdos aqueles que passam pela peneira de malha 4,75 mm (ABNT, 2009).

**Agregados graúdos:** São os agregados que passam pela peneira 75 mm e ficam retidos na peneira 4,75 mm.

A granulometria dos agregados tem sua determinação especificada na NBR NM 248/2003 e as peneiras são especificadas na NBR NM ISO 3310-1/2010.

### 2.1.2.3 Água

A água tem uma função muito importante na mistura dos concretos e argamassas, ela desencadeia as reações químicas de hidratação do cimento Portland, a partir das quais são alcançadas a resistência e durabilidade do material (BASTOS, 2014).

Outras funções da água, além da hidratação do cimento, proporciona a coesão, que é a resistência da mistura à segregação de seus componentes (MEHTA & MONTEIRO, 2008), e a consistência, que é a maior ou menor facilidade da mistura se deformar sob ação de sua própria massa, no estado plástico (fresco) da mistura, proporcionando assim condições de aplicabilidade no local de seu uso (BASTOS, 2014).

A água de abastecimento público, comumente utilizada em obras de construção, é um tipo de água considerado adequada para o uso em concretos e argamassas, já uma água salobra tem restrições de uso, somente podendo ser usada em concreto simples (não-armado), pois as substâncias nela contida (sais) poderiam reagir com a armadura promovendo a oxidação da mesma (BASTOS, 2014).

Outros tipos de água, como de poços, de superfície (rios, lagos), água residual de processos industriais, água reaproveitada pós-tratamento do esgoto, para serem usadas precisam ser analisadas de acordo com a norma NBR 15900 (ABNT, 2009).

A água é ainda essencial para o processo de cura dos concretos e argamassas, seu uso, mediante a saturação constante com água do elemento construído, é a melhor forma

de garantir a hidratação do cimento e de evitar o aparecimento de fissuras (BASTOS, 2014).

## **2.2 Fibras para reforço de compósitos**

### **2.2.1 Vantagens da utilização de fibras vegetais em relação às sintéticas**

A conscientização quanto à questão ambiental, aliada a cada vez maior escassez de produtos naturais não-renováveis tem estimulado as indústrias como a construção civil a desenvolver substitutos sustentáveis a seus produtos, nos quais se encaixam as fibras naturais em substituição às fibras sintéticas convencionais. As fibras naturais são uma alternativa tecnicamente viável ao aço e fibras poliméricas, possuindo boas características físicas, químicas e mecânicas e baixo custo. Contribuem ainda para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera e seu processo de produção requer bem menos energia que as fibras sintéticas (CAMPELLO et al., 2016; MAZZETO et al., 2017).

Além de serem um recurso renovável, as fibras vegetais são abundantes em todo o mundo (BRANDT, 2008). Fibra mineral utilizada tradicionalmente, o amianto está sendo proibido em todo mundo pelos riscos potenciais à saúde, sendo um material cancerígeno.

O amianto foi substituído pelas fibras sintéticas como o PVA e o polipropileno para a confecção de compósitos de fibrocimento, no entanto essas fibras sintéticas necessitam de compostos fenólicos como antioxidantes e aminas como estabilizadores de ultravioleta, além de outros componentes altamente agressivos ao meio ambiente (BERGE, 2009).

As fibras vegetais possuem boas propriedades mecânicas como alta resistência à tração, baixa densidade, baixo coeficiente de expansão térmica e baixo módulo de elasticidade, se configurando como ótima opção para reforço de compósitos (PACHECO-TORGAL & JALALI, 2011; PARVEEN, 2017).

As propriedades de algumas fibras vegetais e sintéticas se encontram na Tabela 02.

**Tabela 02** – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais e sintéticas.

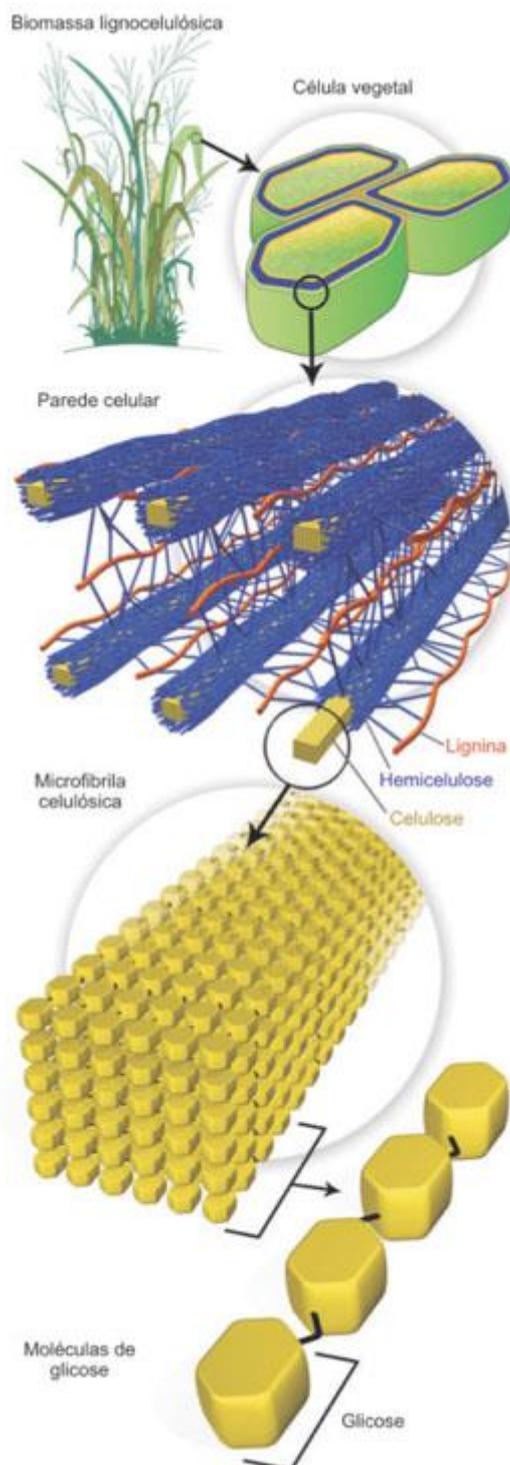
<b>Fibras</b>	<b>Peso específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
Sisal <sup>1</sup>	1370	110	347-378	15,2
Côco <sup>1</sup>	1177	93,8	95-118	2,8
Bambu <sup>1</sup>	1158	145	73-505	10-40
Cânhamo <sup>1</sup>	1500	85-105	900	34
Congo Jute <sup>1</sup>	1409	182	300-500	10-40
Banana <sup>1</sup>	1031	407	384	20-51
Piaçava <sup>1</sup>	1054	34-108	143	5,6
Dendezeiro <sup>2</sup>	1300-1450	60-84	70-170	3,5-4
Polipropileno <sup>1</sup>	913	-	250	2,0
PVA <sup>3</sup>	1300	-	900	23
Aço <sup>4</sup>	7800	-	4100	210
Carbono <sup>4</sup>	1800	-	1500-5500	150-500

**Fontes:** <sup>1</sup>ARSÈNE et al., 2003; <sup>2</sup>KRIKER et al., 2005; <sup>3</sup>PASSUELO et al., 2009; <sup>4</sup>MOON et al., 2011.

Variados estudos foram realizados com fibras naturais para reforço de matrizes cimentícias, como o bambu (CAMPELLO et al., 2016; BRESCANSIN, 2003; XIE et al., 2019; YAO & LI, 2003; WAHYUNI et al., 2014; CORREIA et al., 2014), como o sisal (JOAQUIM et al., 2009; FUJIYAMA, 1997; LIMA, 2007), como o curauá (PICANÇO & GHAVAMI, 2008; BILCATI, 2015), como o côco (SILVA et al., 2014; JHON, 2005; GUNASEKARAN, 2011; RODRÍGUEZ, 2011; RAMIRES, 2012; SILVA, 2012; RAMLI, 2013; PEREIRA, 2013), como a juta (TEIXEIRA, 2014). Os resultados mostraram a viabilidade do uso de fibras naturais como reforço em compósitos cimentícios, apresentando ganhos significativos de resistência mecânica dos compósitos com a adição de fibras vegetais.

### 2.2.2 Composição das fibras celulósicas

As fibras vegetais têm em sua composição a celulose, hemicelulose e lignina (Fig. 08), onde a proporção de cada componente desse pode variar de acordo com sua origem, podendo ainda sofrer variações causadas pelo tipo de clima, solo e etc. Outros componentes que podem ser encontrados e não fazem parte da parede celular, são proteínas, lipídeos e cinzas (ZHANG & LYND, 2004).



**Figura 08** – Principais componentes da fibra vegetal

Fonte: SANTOS, et al., 2012

### 2.2.2.1 Celulose

A celulose é o polímero natural mais abundante na natureza, além de ser renovável e biodegradável (ROWELL et al., 2005; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017).

A celulose é basicamente formada por átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio, compondo um polímero de cadeia linear longa, esses átomos formam moléculas de

monossacarídeos  $\beta$ -D-glicose as quais se unem por meio de ligações glicosídicas, dando origem à celobiose, as quais são unidades da celulose (Figura 09) (PIMENTA, 2005).

Por meio dos grupos funcionais hidroxila, a celulose apresenta alta regularidade em sua estrutura devido às ligações de hidrogênio. As moléculas de celulose por sua vez originam as microfibrilas, estas formam as fibrilas e por fim as fibras de celulose (PIMENTA, 2005).

Existem dois tipos de celulose, a celulose em sua forma pura chamada  $\alpha$ -celulose, não solúvel em solução de hidróxido de sódio a 17,50%, e a hemicelulose, a qual é solúvel na solução. A junção dos dois tipos de celulose forma a holocelulose, que representa todo o carboidrato presente no vegetal, após a remoção da lignina (PATURAU, 1989).

A celulose pode ser extraída de vegetais, algas, bactérias, e algumas criaturas marinhas como o molusco tunicado (MOON et al., 2011; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017). A parede celular das plantas ainda é a fonte mais utilizada para extração da celulose (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017), sendo um material de renovação muito lenta, devido ao longo tempo que as árvores levam para amadurecer até o ponto de extração. Assim, visando a otimização do processo e ecoeficiência, fontes alternativas com maior velocidade de regeneração devem ser viabilizadas (MATSUMOTO et al., 2001).

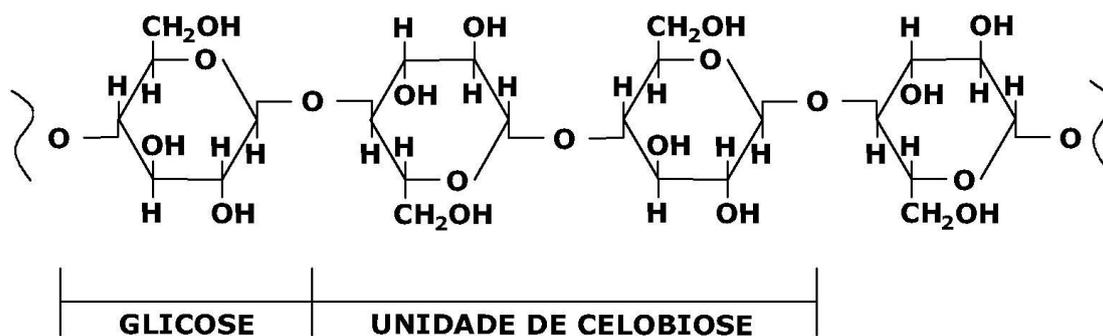
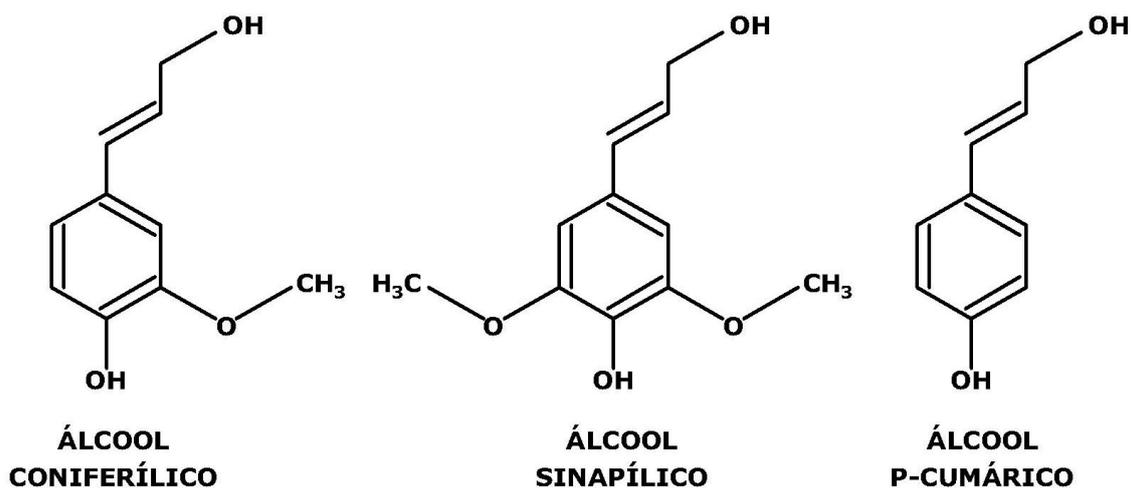


Figura 09 – Estrutura molecular da celulose.

### 2.2.2.2 Lignina

A lignina é a segunda mais abundante molécula orgânica da natureza, depois da celulose. É um componente hidrofóbico, com estrutura tridimensional, amorfa e ramificada (LEHNINGER et al., 2002; SILVA et al., 2011).

É o terceiro componente mais importante da parede celular, representando de 20% a 30% de sua composição, sendo formado a partir de 3 compostos (Fig. 10): o álcool coniferílico, o álcool sinapílico e o álcool p-cumarílico (NASCIMENTO, 2007).



**Figura 10** – Estrutura molecular dos álcoois precursores da lignina.

A estrutura da lignina é mais complexa que a da celulose e a da hemicelulose por possuir vários precursores podendo possuir várias combinações diferentes entre os mesmos (MARABEZI, 2009).

A lignina é um constituinte característico dos vegetais superiores, que tem como função a resistência mecânica, transporte de líquidos, nutrientes, metabólitos e proteção contra o ataque de patógenos (FENGEL & WEGENER, 1989; CAMPBELL & SEDEROFF, 1996; LEHNINGER et al., 2002).

O teor de lignina varia muito de acordo com o tipo de vegetal e também no mesmo vegetal, entre seus variados componentes morfológicos. Na utilização da madeira, ela permanece na composição, porém para uso de polpa celulósica, ela precisa ser removida (FENGEL & WEGENER, 1989).

### 2.2.2.3 Hemicelulose

A hemicelulose ou poliose é um polissacarídeo (FENGEL & WEGENER, 1989), sendo o segundo componente mais importante da parede celular, representando 15% a 35% da sua composição (PALMA, 1993).

Sua estrutura é mais similar à celulose do que à lignina, possuindo baixa massa molecular composta por pentoses, hexoses e ácidos urônicos (Fig. 11) (GÍRIO et al., 2010). A diferença para a celulose se dá pelo fato que são compostas por variados tipos de açúcares, possuindo ramificações e envolverem as fibras celulósicas (CORREIA, 2011).

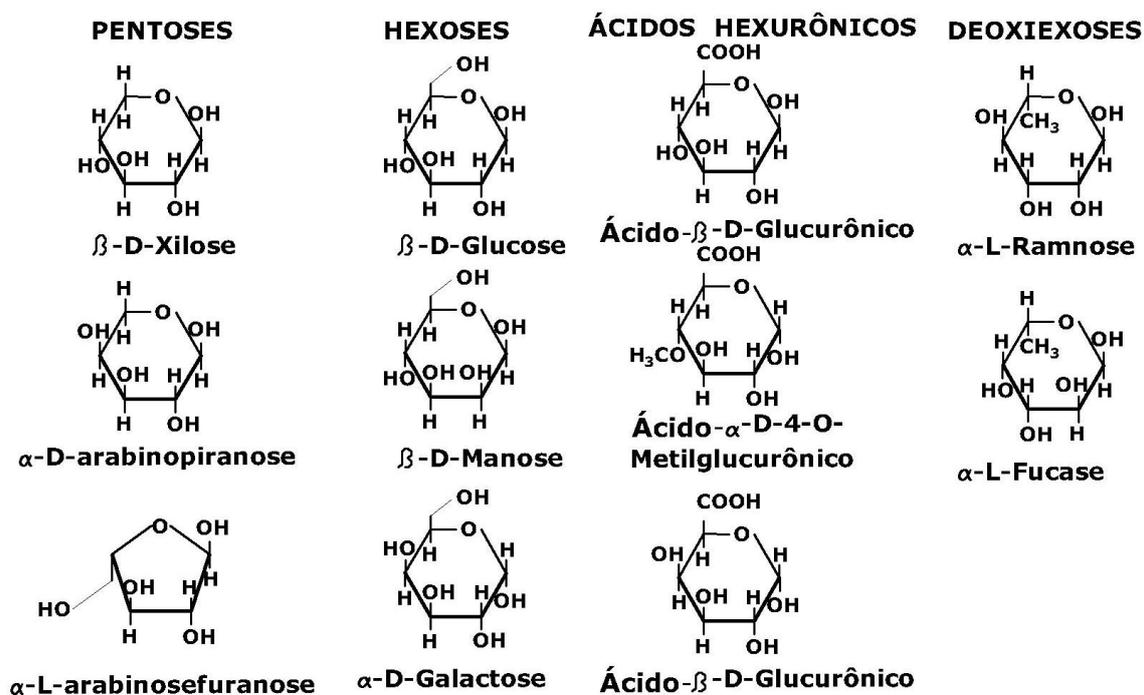


Figura 11 – Carboidratos formadores da hemicelulose.

Por ser um componente amorfo e possuir um grau de polimerização bem menor que a celulose, são muito susceptíveis à hidrólise ácida e solubilização em bases (FENGEL & WEGENER, 1989).

Uma de suas funções é estabilizar a estrutura da fibra vegetal, fazendo a ligação entre as moléculas de celulose e lignina por meio de pontes de hidrogênio. A hemicelulose também pode servir como reserva de energia extracelular, armazenagem de produtos brutos e reserva de água em sementes (FENGEL & WEGENER, 1989; WYMAN et al., 2005).

As hemiceluloses podem existir tanto na região compreendida entre a celulose e a lignina, quanto em regiões lignificadas (FENGEL & WEGENER, 1989). Importantes propriedades são conferidas às fibras celulósicas pela presença da hemicelulose, como mobilidade, flexibilização e aumento da área de ligação entre as fibras (D'ALMEIDA & PHILLIP, 1988).

#### 2.2.2.4 Holocelulose

Holocelulose é a combinação da celulose e da hemicelulose. A maior parte dos açúcares dos materiais lignocelulósicos é composto por essa combinação (SANTOS, 2008).

A holocelulose é isolada após o processo de deslignificação, onde a lignina é removida. O ideal é que neste processo haja a remoção da lignina sem prejuízo dos teores

de holocelulose, porém não é possível, geralmente sendo degradada parte da holocelulose (KLOCK et al., 2005).

### 2.2.2.5 Extrativos

São compostos químicos que não pertencem à estrutura da parede celular vegetal, com peso molecular baixo, sendo possível sua extração por meio da utilização de água quente, álcool, benzeno ou outros solventes orgânicos (HILLIS, 1962; BARRICHELO & FOELKEL, 1985).

Para a produção de polpa celulósica, devem ser removidos no processamento. Se o teor de extrativos for alto, a produção de polpa será baixa. Se a quantidade residual de extrativos na polpa celulósica for pequena a sua influência nas características da polpa será irrisória (PIMENTA, 2005).

A Tabela 03 mostra um comparativo dos teores de cada componente químico da parede celular vegetal entre os variados tipos de fibras celulósicas.

**Tabela 03** – Composição química de algumas fibras vegetais.

<b>Fibra</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Extrativos (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>
Bagaço de cana <sup>1</sup>	21,80	41,70	28,00	4,00	3,50
Folha da bananeira <sup>1</sup>	24,84	25,65	17,04	9,84	7,02
Caule da bananeira <sup>1</sup>	15,07	31,48	14,98	4,46	8,65
Fibra de côco (fruto) <sup>1</sup>	46,48	21,46	12,36	8,77	1,05
Fibra de côco (caule) <sup>1</sup>	29,70	31,05	19,22	1,74	8,39
Eucalipto <sup>1</sup>	25,40	41,57	32,56	8,20	0,22
Sisal <sup>1</sup>	11,00	73,11	13,33	1,33	0,33
Bambu <sup>2</sup>	18,40	40,30	27,00	13,40	2,20
Palha de trigo <sup>3</sup>	17-19	33-38	26-32	-	-
Palha de cevada <sup>4</sup>	18,8	37,6	34,9	-	-

**Fontes:** <sup>1</sup>ARSÉNE et al., 2003; <sup>2</sup>GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017; <sup>3</sup>SILVA, 2009; <sup>4</sup>SUN et al., 2005.

## 2.3 Modificações na matriz cimentícia para compatibilização química com as fibras vegetais

As fibras celulósicas polpadas possuem uma boa performance mecânica como micro-reforço de compósitos cimentícios, porém tem a desvantagem de possuir baixa durabilidade ao ataque químico ocasionado pela alta alcalinidade da matriz cimentícia (MOHR et al., 2005; MOHR et al., 2007).

A matriz cimentícia pode ser modificada de modo a promover a compatibilidade química necessária para garantir a durabilidade das fibras no compósito, sendo uma forma de se promover essa compatibilidade é a adição de material pozolânico para diminuir o ataque alcalino às fibras, devido a reação da pozolana com o hidróxido de cálcio do cimento, diminuindo a porosidade capilar, melhorando diretamente tanto a resistência mecânica quanto a durabilidade das fibras (MOHR et al., 2007; GLEIZE et al., 2007; GUNYISI et al., 2012).

Outra modificação que se pode fazer na matriz é na cura do compósito, como a utilização da carbonatação acelerada na cura proporciona o refino da estrutura capilar dos poros, diminuindo a alcalinidade, melhorando a aderência das fibras com a matriz e garantindo a durabilidade da fibra celulósica (ALMEIDA et al., 2013).

### 2.3.1 Pré-tratamento das fibras celulósicas

As fibras celulósicas e o cimento possuem composição química totalmente diferentes, ocasionando uma incompatibilidade quando são misturados, fazendo-se necessários tratamentos químicos nas fibras, alterando a sua composição (Fig. 12) e diminuindo a incompatibilidade com o cimento (KABIR et al., 2012).

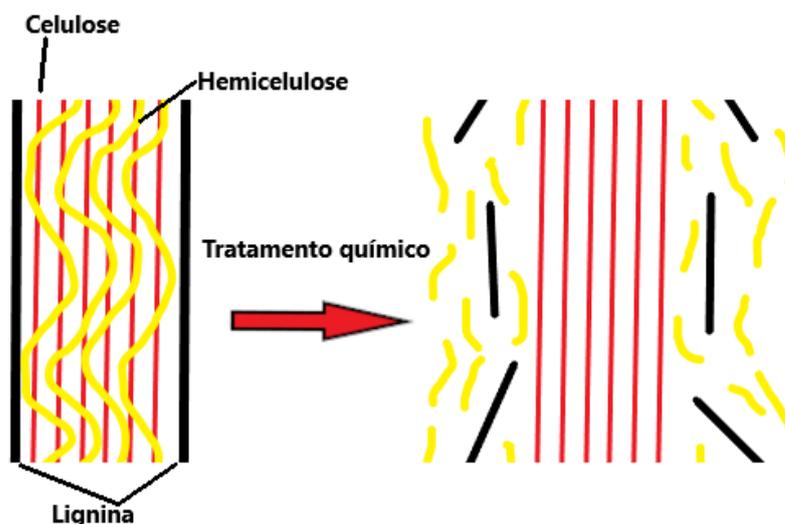


Figura 12 - Efeito do pré-tratamento na estrutura da fibra vegetal.

Antes de se produzirem as fibras celulósicas, um processo muito importante deve ser realizado que é a remoção parcial ou completa da hemicelulose, lignina e extrativos (MOON et al., 2011; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017), tornando assim as fibras celulósicas mais acessíveis (HUBBEL & RAGAUSKAS 2010) e diminuindo a incompatibilidade química entre a matriz cimentícia e as fibras vegetais (FERRAZ, 2011; MORI et al., 2007). Esse processo de individualização das fibras celulósicas, com a remoção dos componentes amorfos denomina-se polpação, onde as características, tipos

de aplicação e qualidade da polpa depende do tipo de processo de polpação utilizado (D'ALMEIDA & PHILLIP, 1988).

Dentre os processos de polpação, o mais comum é o Kraft, que cozinha a fonte de fibras celulósicas em solução alcalina de Hidróxido de Sódio ou Sulfeto de Sódio, gerando fibras branqueáveis e de boa resistência mecânica, possuindo rendimento de produção de polpa na ordem de 50% a 60% do total de material utilizado (D'ALMEIDA & PHILLIP, 1988).

Na primeira etapa da polpação, a lignina é parcialmente removida. Como complemento da primeira etapa, é realizado o branqueamento da polpa, que além de promover a alvura das fibras (VÁRNAI et al., 2010), já que em geral a polpa deslignificada possui coloração castanho escura, também remove a lignina e hemicelulose residuais não eliminados na primeira etapa. Através deste processo, os componentes amorfos da fibra celulósica são removidos, aumentando o valor agregado do produto pela sua alvura (CHERIAN et al., 2008).

No branqueamento podem ser utilizados diversos reagentes como Peróxido de Hidrogênio, Ácido Acético, Hipoclorito de Sódio, Hidróxido de Sódio (também utilizado na primeira etapa) e ainda possíveis combinações entre os mesmos (HUBBEL & RAGAUSKAS, 2010).

Alguns tratamentos químicos auxiliares podem ser realizados objetivando a melhoria de qualidades da fibra vegetal, como o uso de silanos para redução da absorção de água pelas fibras (CASTELLANO et al., 2004; ABDELMOULEH et al., 2004).

#### **2.4 O bambu *Guadua spp* como fonte de fibras celulósicas**

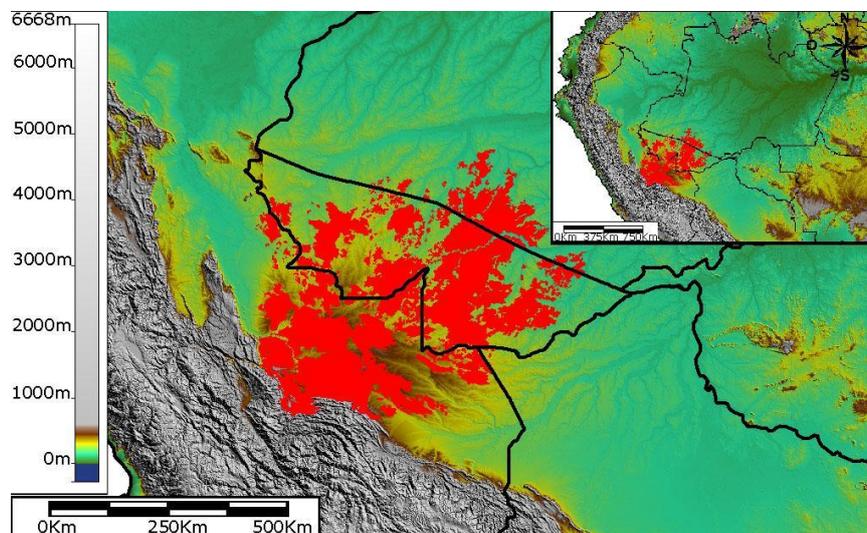
O bambu é uma gramínea, da família Poaceae, existindo aproximadamente 50 gêneros e 1300 espécies pelo mundo todo, ocorrendo nos trópicos e em regiões temperadas, dentro das latitudes 46 °N até 47 °S, em altitudes que variam do nível do mar até 4.300 m (ZHANG & CLARK, 2000).

Na Amazônia Sul-ocidental existem grandes áreas de floresta nativa com predominância de bambu no sub-bosque (Fig. 13), principalmente pelo gênero *Guadua*, ocupando uma área de aproximadamente 161.500 km<sup>2</sup> (Fig. 14) (CARVALHO et al., 2013). As espécies de bambu mais frequentes na Amazônia são *Guadua sarcocarpa* e *G. weberbaueri* Pilg. (LONDONO & PETERSON, 1991).



**Figura 13** - Interior de uma floresta com o sub-bosque dominado pelo bambu (*Guadua spp.*) no Parque Estadual Chandless, Acre.

Fonte: FERREIRA, 2014



**Figura 14** - Localização e distribuição das florestas com bambu (manchas escuras) no sudoeste da Amazônia.

Fonte: BIANCHINI, 2005.

Vários estudos realizados mostraram que o Brasil possui a maior diversidade de espécies de bambu, com aproximadamente 137 espécies e 17 gêneros em todo território nacional (JUDZIEWICZ et al., 1999), e uma das maiores reservas do planeta, ocorrendo em sua maioria na Amazônia Sul-ocidental (MIRANDA et al., 2017).

No estado do Acre, um levantamento mostrou que existem 10.969.410 hectares de florestas com predominância de bambu no sub-bosque, sendo a área de bambu 4.563.688 ha, ou 41,60% do total dessas florestas, sendo Feijó o município com maior quantidade de bambu (1.122.460 hectares) e Plácido de Castro com a menor quantidade

(439 hectares), e a da capital Rio branco tem a 6ª maior quantidade de bambu (296.215 hectares) (CARMO et al., 2017).

Por sua abundância, ótimas qualidades e variadas possibilidades de uso, o bambu é uma matéria-prima com grande potencial econômico, oportunizando assim a exploração econômica da biodiversidade (AFONSO, 2011).

O bambu tem se mostrado uma fibra vegetal muito promissora tanto para o uso de sua polpa como para uso como elemento de reforço em compósitos, possuindo o crescimento mais rápido entre as tipologias lingocelulósicas, sendo um ótimo substituto para a madeira, que é a mais tradicional fonte de celulose, possuindo abundância em todo planeta e baixo custo quando comparado a outras fontes de celulose, podendo ser utilizado em materiais de construção civil, como compósitos à base de cimento Portland (COUTTS, 1995; LIMA et al., 2008).

## **2.5 Adição de nanofibras celulósicas nos compósitos cimentícios**

### **2.5.1 Nanotecnologia**

A nanotecnologia pode ser considerada como uma aplicação da nanociência, que estuda os materiais na escala nanométrica, um nanometro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) e é considerada uma nova área de estudo, regida pelas leis da física quântica onde as propriedades das partículas guiam o comportamento dos nanomateriais. A nanotecnologia pode ser definida como a ciência que envolve a compreensão, o controle e a reestruturação da matéria em escala de nanômetros, mais precisamente menor que 100 nm, visando criar materiais com novas propriedades, de acordo com sua finalidade. Os nanocompósitos são materiais híbridos em que pelo menos um dos componentes tem dimensões nanométricas e são obtidos a partir da adição de nanopartículas de determinado material em um determinado matriz polimérico, do qual se pretende melhorar suas propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e nanoestruturais (SHAMIM et al., 2018).

Diante de tão grande potencial da nanotecnologia, surgiram várias pesquisas realizando modificações em escala nanométrica de materiais como os nanotubos de carbono, cerâmica, vidro, aço, polímeros, revestimentos, filmes com características multifuncionais, nanopartículas de celulose, dentre outros (AFIFY et al., 2017; IJIMA, 1991; KHUSHNOOD et al., 2015; LIANG et al., 2009; MOON et al., 2011; RIZWAN & BIER, 2012; ZIEGLER et al., 2016).

Tendo em vista a grande demanda por materiais cada vez mais eficientes, a construção civil tem a nanotecnologia como aliada nesse objetivo, podendo melhorar

ainda mais as características dos materiais compósitos reforçados com nanomateriais, como a resistência mecânica, e ecoeficiência dos materiais de construção, proporcionando funcionalidades únicas, otimizando características e corrigindo deficiências existentes nos materiais, levando o processo de construção a um novo patamar (SHAMIM et al., 2018; SANCHEZ & SOBOLEV, 2010).

### **2.5.2 Tipos de nanopartículas celulósicas**

A celulose é o polímero natural mais abundante existente, também sendo considerado um material renovável e biodegradável. Objetos de muitos estudos atualmente, as nanopartículas celulósicas (NPC's) são materiais celulósicos obtidos a partir de plantas, possuindo dimensões nanométricas e micrométricas, sendo considerado um material promissor para o desenvolvimento de novos biocompósitos de alta performance (HISSEINE et al., 2019; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017).

As nanopartículas celulósicas estão sendo utilizadas para variadas finalidades, como elemento de reforço em polímeros (ORTS et al., 2005; TANG & ALAVI, 2011; MEDEIROS et al., 2008), fármacos (VILLANOVA et al., 2011), embalagens e filmes (SYVERUD et al., 2011), construção civil (HOYOS et al., 2013; ARDANUY et al., 2012; CORREIA et al., 2018; HISSEINE et al., 2019), biomedicina (CZAJA et al., 2007).

As NPC's se subdividem em nanocristais celulósicos e nanofibras celulósicas (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017; SILVA et al., 2018; PARVEEN et al., 2017)

Os nanocristais celulósicos são compostos de uma estrutura altamente cristalina e com módulo de elasticidade (ou módulo de Young) bastante elevado se comparado à celulose não processada (EICHHORN et al., 2010).

Já as nanofibras celulósicas possuem estrutura linear, formada por moléculas de celulose e contém além da celulose, componentes amorfos (MORAN-MIRABAL & CRANSTON, 2015). Possuem comprimento variando na ordem do micrômetro e nanométrico com diâmetro variando entre 2 e 20 nm, de acordo com seu processo de produção (CHEN et al., 2011).

### **2.5.3 Métodos de obtenção de nanofibras celulósicas**

A celulose pode ser obtida de diversas fontes, os vegetais ainda são as principais fontes para extração de nanofibras de celulose (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017). Normalmente, as nanofibras celulósicas são produzidas a partir da polpa de madeira (TERAMOTO et al., 2007; TONOLI et al., 2012), polpa de bambu (PHONG et al., 2013;

GUIMARÃES JR. et al., 2015; CORREIA et al., 2016), bagaço da cana de açúcar (HASSAN et al., 2012).

As nanofibras celulósicas são obtidas a partir do processamento da polpa celulósica, podendo utilizar processamento mecânico como o homogeneizador de alta pressão (STELTE & SANADI, 2009), microfluidizador (SIQUEIRA et al., 2009), o moinho de discos (CORREIA et al., 2016) e o moinho de bolas (TERAMOTO et al., 2008). Também podem ser obtidas por processo químico, como a oxidação da polpa celulósica pelo reagente químico 2, 2, 6, 6-tetrametilpiperidina-1-oxil (TEMPO) (JIAO, 2016).

#### **2.5.4 Vantagens da utilização das nanofibras**

As vantagens da utilização das nanofibras celulósicas se dão por suas características únicas, como alta superfície específica, isto é, grande área de superfície por unidade de volume, alta resistência mecânica, como alto módulo de elasticidade (SAMIR et al., 2005; MEDEIROS et al., 2008; KUMODE et al., 2013), e também alta resistência à tração, baixa expansão térmica e alta razão de aspecto (largura/comprimento) (EICHHORN et al., 2010). Todas essas características põem as nanofibras de celulose como alternativa viável para o reforço de nanocompósitos (KUMODE et al., 2013).

É possível citar, ainda, as qualidades das nanofibras em comparação às macrofibras, que, por suas características, possuem vantagens de aplicação nanotecnológica que não podem ser oferecidas pelas macrofibras, pois estas possuem baixa superfície específica comparado às nanofibras. A alta superfície específica das nanofibras permitem forte aderência com o compósito reforçado por ela (MOON et al., 2011).

As nanofibras, por suas qualidades, podem superar as desvantagens das macrofibras como reforço de compósitos à base de cimento, como baixo módulo de elasticidade (JARABO et al., 2012), incompatibilidade química entre a fibra e a matriz (FARUK et al., 2012), e falta de padronização nas propriedades de fibras, o que ocasiona grande variação na qualidade e desempenho de concreto (AZIZ et al., 1981).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Coleta e produção da polpa celulósica do bambu

As varas de bambu foram coletadas em uma propriedade rural localizada no Ramal Riozinho do Rola km 11, em Rio Branco, Acre, região da Rodovia Transacreeana, nas coordenadas 10° 5'2.87"S; 67°53'53.59"O. Foram coletadas 6 varas de bambu ao todo.

As amostras de bambu coletadas possuíam cerca de 3 m de comprimento médio e 4 cm de diâmetro médio, possuindo coloração verde e ramos dos quais brotam espinhos de cerca de 3 cm, mostradas na figura 15.



**Figura 15** – Bambu no local da coleta – Ramal do Riozinho do Rola/Detalhe das amostras.

Para a produção da polpa celulósica, o bambu foi cortado em cavacos de cerca de 5mmx5mm, usando somente o colmo e descartando os nós. Após isso foi triturado em um moinho de facas TECNAL® Tipo Cróton Te-625 (Figura 16), no Complexo Bionorte da UFAC.



**Figura 16** – Moinho de facas utilizado para moagem dos cavacos de bambu.

Para a produção da polpa, foram utilizados dois métodos de deslignificação diferentes, seguidos do mesmo tipo de branqueamento.

No primeiro método, a deslignificação do bambu triturado foi feita com solução de NaOH a 5%, na proporção de 30 g de bambu para 600 mL de solução, por 2 h à temperatura ambiente e agitação constante (CORDEIRO et al., 2014). Em seguida, foi realizado o branqueamento da polpa com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 24% (v/v) e NaOH a 4% (m/m) (1:1), na proporção de 1 g de fibra para 20 mL da solução, por 2 h a 50 °C e agitação constante. Foram produzidas polpas com 1, 2 e 3 branqueamentos (CORDEIRO et al., 2014).

No segundo método a deslignificação do bambu triturado foi feita com solução de NaOH a 2%, na proporção de 30 g de bambu para 1200 mL de solução, por 4 h a 80 °C e agitação constante, por 4 vezes (MACHADO et al., 2014). Em seguida, foi realizado o branqueamento da polpa com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 24% (v/v) e NaOH a 4% (m/m) (1:1), na proporção de 1 g de fibra para 20 mL da solução, por 2 h a 50 °C e agitação constante (CORDEIRO et al., 2010). Foram produzidas polpas com 1, 2 e 3 branqueamentos.

A tabela 04 mostra um resumo dos métodos de polpação utilizados.

**Tabela 04** – Resumo dos métodos de polpação utilizados.

<b>Método</b>	<b>Deslignificação</b>	<b>Branqueamento</b>
<b>01</b>	NaOH a 5% (1x)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 24% + NaOH 4% (01x)
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 24% + NaOH 4% (02x)
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 24% + NaOH 4% (03x)
<b>02</b>	NaOH a 2% (4x)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 24% + NaOH 4% (01x)
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 24% + NaOH 4% (02x)
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 24% + NaOH 4% (03x)

## 3.2 Caracterização morfológica e química das polpas

### 3.2.1 Determinação da composição química da polpa

#### 3.2.1.1 Análise do teor de celulose

O teor de celulose das fibras foi determinado pelo método FDN/FDA, utilizando ácido sulfúrico a 72% (VAN SOEST, 1991). O método considera que as frações constituintes dos vegetais podem ser divididos em conteúdo celular (como amido, gorduras, lipídios e compostos solúveis em água) e em parede celular (como a hemicelulose, celulose e lignina).

O método consiste em separar o conteúdo celular da parede celular. Parte da amostra é aquecida imersa em solução de detergente neutro, assim o conteúdo celular é solubilizado no detergente, já a parede celular não é solubilizada, podendo assim ser separada por filtragem. O conteúdo resultante é denominado solúvel em detergente neutro, compostas por proteínas, nitrogênio não-proteico e pelas FDN – Fibras em detergente neutro (compostas por celulose, hemicelulose e lignina).

Fibras em detergente ácido (FDA): Utilizando solução de detergente ácido, a hemicelulose e a celulose são dissolvidas e assim a lignina pode ser separada por filtragem, formando duas frações distintas, fração solúvel em detergente ácido e Fibras em Detergente Ácido.

#### 3.2.1.2 Determinação dos grupos funcionais e confirmação da redução do teor de lignina e hemicelulose por meio da espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

As amostras celulósicas foram submetidas à análise de espectroscópica de Infravermelho por absorção, no Instituto de Criminalística da Polícia Civil do Estado do Acre, com equipamento Spectrum RX I PerkinElmer (Figura 17). As pastilhas foram preparadas com KBr, e então as amostras foram analisadas com 16 varreduras, na faixa de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

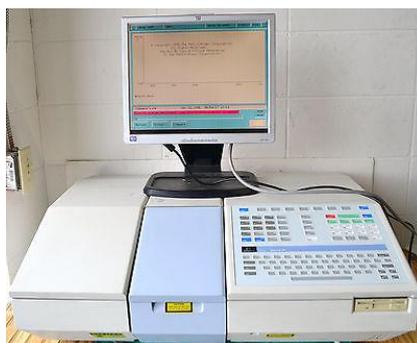


Figura 17 – Espectrofotômetro de radiação infravermelha por absorção.

### 3.2.1.3 Determinação da cristalinidade - DRX

Por meio do equipamento Difratorômetro de Raios X (Figura 18), foi determinada a cristalinidade das polpas produzidas. A cristalinidade está ligada diretamente com o teor de celulose da amostra, já que a mesma compreende a fração cristalina na composição da fibra vegetal. O ensaio foi realizado no Departamento de Geociência da Universidade Federal do Amazonas, com equipamento modelo Shimadzu XRD 6000®, utilizando tubo de raios X com radiação  $\text{Cu K}\alpha$ , comprimento de onda de 0,15418 nm. A configuração utilizada foi monocromador com fendas (1, 1, 0,30), a 40 kV e corrente de 30 mA e velocidade de 2000 deg/min.



Figura 18 – Difratorômetro de Raios X.

### 3.2.1.4 Análise termogravimétrica - TGA

A análise de termogravimetria visou avaliar a estabilidade das fibras diante da mudança controlada de temperatura e foi realizada no Complexo Bionorte da UFAC, por meio de um calorímetro Netzsch®, modelo Júpiter STA449-F3 (Figura 19). A atmosfera de nitrogênio estava ajustada para um fluxo de 20,00 mL/min, e a taxa de aquecimento ajustada para as análises térmicas foram realizadas no complexo BIONORTE da UFAC em um aumento de 10,00 °C a cada minuto, até que se chegasse à temperatura final de 600 °C. A quantidade de polpa celulósica de bambu analisada foi de 20 mg, em recipientes de óxido de alumina.



Figura 19 – Equipamento de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)/Análise Térmica Diferencial (DTA).

### 3.2.1.5 Caracterização morfológica da polpa celulósica

Por terem apresentado maior teor de celulose na sua composição, as fibras lavadas 4 vezes com NaOH a 2% e branqueadas 3 vezes com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 24% + NaOH 4% foram escolhidas para a caracterização morfológica através de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), no Serviço de Microscopia Eletrônica do Instituto Gonçalo Moniz-IGM, FIOCRUZ-BA, e posterior adição no compósito cimentício.

Para a realização da microscopia, as amostras de fibras celulósicas foram diluídas em água destilada, colocando 10 microlitros da solução sobre a grade de níquel de 400 mesh revestida com filme de formar, retirando o excesso de líquido com papel de filtro e aguardando 60 s. Após isso, a solução contrastante de Acetato de Uranila a 2% foi centrifugada por 10 minutos a 10.000 rpm, e logo depois 10 µL do contrastante foram gotejados sobre a grade do microscópio com a amostra de fibras celulósicas, retirando o excesso com papel de filtro e aguardando 30 s. Então, a grade foi observada no Microscópio Eletrônico de Transmissão, modelo JEOL® 1230, a 80 kV (Figura 20).



**Figura 20** – Microscópio Eletrônico de Transmissão.

Realizadas as visualizações e obtidas as imagens da amostra, as mesmas foram analisadas através do software Digital Micrograph®, onde foram realizadas medições de comprimento e diâmetro de 30 fibras.

### 3.3 Confeção dos corpos de prova de argamassa

#### 3.3.1 Cimento Portland

O cimento utilizado para a confecção dos corpos de prova foi o Cimento Portland Pozolânico do tipo CP IV – Classe 32 Mpa.

#### 3.3.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia obtida comercialmente na cidade de Rio Branco, Acre, cujas granulometrias foram determinadas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), e assim determinando seu módulo de finura e propriedades físicas.

O uso da areia comercial se deu em função da grande dificuldade logística em se obter areia normal do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, sediado na cidade de São Paulo/SP, cuja distância e valor do frete são muito elevados para a cidade onde a pesquisa está sendo realizada (Rio Branco/AC). Outro motivo é que a pesquisa não visa aferir a resistência do cimento Portland em si, mas comparar a resistência do mesmo sem a adição das nanofibras e com a adição de nanofibras.

#### 3.3.3 Adição de nanofibras de bambu

Os teores de adição de nanofibras foram adaptados de Onuaguluchi et al (2014), nas porcentagens de 0% (controle), 0,05%, 0,10%, 0,20%, 0,40% e 0,60%, em massa de nanofibras em relação à massa do cimento.

### 3.4 Dosagem e mistura da argamassa

A dosagem dos insumos a serem utilizados a cada mistura utilizou as quantidades apresentadas na Tabela 05.

**Tabela 05** – Quantidade de materiais para confecção da argamassa.

<b>Material</b>	<b>Massa para mistura (g)</b>
Cimento Portland	624 +- 4
Água	300 +- 0,2
Areia Comercial	1872 +-1,2

**Fontes:** Adaptado de ABNT, 2019.

A mistura dos materiais foi feita em misturador mecânico de acordo com as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019). Iniciou-se a mistura pela colocação de toda a água no misturador, seguido da colocação do cimento, misturando-os em velocidade baixa por 30 s, sendo a contagem desse tempo iniciada tão logo o cimento entrou em contato com a água. Após esse tempo, sem paralisar o misturador, foi adicionada a areia

aos poucos, cuidando para que a adição da mesma fosse feita gradualmente ao longo de 30 s. Após a colocação da areia, mudou-se a velocidade do misturador para alta, e misturou-se por 30 s. O misturador foi então desligado por 90 s, sendo os primeiros 30 s para retirar a argamassa aderida nas paredes da cuba e na pá, despejando sobre a argamassa misturada, e os 60 s finais, deixando a argamassa repousar. Finalizado o repouso da argamassa, foi misturada em velocidade alta por mais 60 s.

Devido ao aspecto aglomerado das nanofibras após sua produção e secagem, as mesmas foram levemente maceradas junto a parte da água de amassamento da mistura, até que ficasse com bom aspecto de diluição, visando maior dispersão das fibras na argamassa, e em seguida foi juntada e misturada no restante da água por cerca de 2 minutos, antes da adição do restante dos materiais, processo este mostrado na figura 21.



**Figura 21:** Maceração das fibras e diluição na água de amassamento.

### 3.5 Moldagem dos corpos de prova

Terminada a mistura dos materiais, foi iniciada a moldagem dos corpos de prova, em moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT,2019). A argamassa foi inserida nos moldes com espátula, em 4 camadas de altura aproximadamente iguais, sendo cada uma das quatro camadas adensada com 30 golpes do soquete, deixando um leve excesso de argamassa na última camada, acima da borda do molde, levando os moldes para a câmara úmida por 6 h, e após isso, o topo dos corpos de prova foram arrasados com espátula até o nível da borda do molde e retornando-os à câmara úmida.

Para cada um dos 06 traços, moldou-se 12 corpos de prova, totalizando 12 amassamentos, em moldes cilíndricos 5x10 cm (Figura 22), previamente untados com óleo mineral para facilitar a desforma.

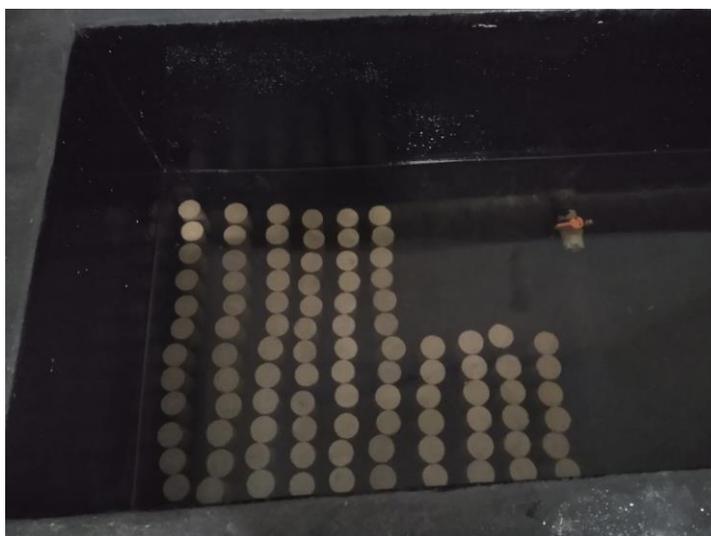


**Figura 22:** Preparo dos moldes para confecção dos corpos de prova.

### 3.6 Cura e desmoldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova totalizaram 24 h de cura inicial na câmara úmida. Em seguida foram retirados dos moldes e imersos em tanque de água saturada com cal, permanecendo até a idade de 28 dias, sendo devidamente identificados visando agrupar as amostras com mesma dosagem de nanofibras.

Depois de 24 h da moldagem, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e colocados no tanque de água para o processo de cura úmida (Figura 23), até a idade de 28 dias onde foram realizados os testes físicos e mecânicos.



**Figura 23:** Corpos de prova em cura úmida no tanque de água.

### 3.7 Testes Físicos

Foram determinadas para as amostras o índice de absorção de água, índice de vazios e massa específica, de acordo com os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2009).

#### 3.7.1 Procedimento

As amostras foram secadas em estufa na temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  por um período de 72 h e depois esfriando em temperatura ambiente e após isso mediu-se a massa da amostra seca ( $M_s$ ), em gramas.

Seguiu-se então com a imersão das amostras em água à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , primeiramente com 1/3 do seu volume imerso por 4 h, depois 2/3 por 4 h e totalmente imerso por 64 h, totalizando 72 h.

Após o período de saturação, determinou-se a massa da amostra imersa em água com a balança hidrostática, e após isso, secou-se as amostras com um pano úmido e determinou-se suas massas saturadas.

Com a determinação destes parâmetros, definimos as propriedades da argamassa a seguir.

#### 3.7.2 Absorção de água

É a capacidade que a argamassa endurecida tem de absorver água pelos seus poros, sendo calculada pela equação (01):

$$A = \frac{(M_{\text{sat}} - M_s)}{M_s} \times 100\% \quad (01)$$

Onde:

A= Absorção de água (%)

$M_{\text{sat}}$  = Massa da amostra saturada em água

$M_s$  = Massa da amostra seca em estufa

#### 3.7.3 Índice de vazios

É a Relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, calculado pela equação (02):

$$I_v = \frac{(M_{\text{sat}} - M_s)}{(M_{\text{sat}} - M_i)} \times 100\% \quad (02)$$

Onde:

$I_v$ = Índice de vazios (%)

$M_i$  = Massa da amostra saturada imersa em água

$M_{sat}$  = Massa da amostra saturada emersa

$M_s$  = Massa da amostra seca em estufa

### 3.7.4 Massa específica

A massa específica real, que é a relação entre a massa e o volume da amostra, e pode ser determinada pela equação (03):

$$M_e = \frac{M_s}{(M_s - M_i)} \quad (03)$$

Onde:

$M_e$  = Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )

$M_i$  = Massa da amostra saturada imersa em água

$M_s$  = Massa da amostra seca em estufa

## 3.8 Testes Mecânicos

### 3.8.1 Equipamento utilizado

Para a realização do ensaio de compressão axial, foram seguidas as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019), e 6 amostras de cada traço foram rompidas na prensa, conforme a Figura 24.



Figura 24: Teste de compressão axial das amostras de argamassa.

### 3.8.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova terão suas bases previamente preparadas, para os testes de resistência à compressão e módulo de elasticidade, através da retificação das bases ou capeamento com material adequado, conforme disposto no item 3.5.5 da NBR 7215 (ABNT, 2019).

### 3.8.3 Resistência à compressão

Os testes de resistência à compressão serão realizados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), após o período de 28 dias da moldagem das amostras, atentando para a tolerância de tempo em relação à idade do ensaio descrita no item 3.5.6.1 da norma.

A resistência à compressão será calculada pela equação (04):

$$F_c = \frac{F}{\pi \times R^2} \quad (04)$$

Onde  $F_c$  é a resistência à compressão, em Mega Pascal-MPa,  $F$  é a força máxima alcançada no teste, antes da ruptura, em Newton, e  $R$  é o raio do corpo de prova, em milímetros-mm.

### 3.8.4 Resistência à tração

A resistência à tração será obtida indiretamente por meio do ensaio de compressão diametral de corpo de prova, de acordo com método descrito na NBR 7222 (ABNT, 2011).

Será utilizado talas de madeira entre o corpo de prova e os pratos, e com o corpo de prova devidamente fixado e centralizado com os pratos da prensa, o corpo de prova será submetido ao carregamento até sua ruptura. Com a carga de ruptura em Newtons, a resistência à tração é calculada pela equação (05):

$$R_t = \frac{2 \times N}{(3,141516 \times \text{comprimento médio} \times \text{diâmetro médio})} \quad (05)$$

Onde:

$R_t$ =Resistência à tração (MPa)

$N$ = Carga de ruptura (Newton)

Comprimento médio/Diâmetro médio – mm

Para a realização do ensaio de compressão diametral, foram seguidas as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011), e 6 amostras de cada traço foram rompidas na prensa conforme a Figura 25.



**Figura 25:** Teste de compressão diametral das amostras de argamassa.

### **3.9 Análise estatística dos dados**

Foram moldadas 6 amostras para cada ensaio e traço, sendo realizados ensaios de compressão axial e de compressão diametral, e 6 traços com diferentes teores de incorporação de nanofibras de bambu, com um traço controle sem incorporação de nanofibras, sendo todas rompidas aos 28 dias de idade. O total de amostras confeccionadas foi de 72 corpos de prova cilíndricos.

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos foram analisados por meio do Delineamento Inteiramente Casualizado (Figura 26), pois as amostras foram produzidas em condições homogêneas em laboratório, testando a homogeneidade das variâncias e normalidade dos dados. Atendidos os pressupostos, foi realizada a análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey a 5% de significância para comparação das médias dos resultados. Para a realização dos cálculos necessários, foi utilizado o programa Action Stat ®. (DEVORE, 2006; VIEIRA 2006)

ANÁLISE ESTATÍSTICA						
PROPRIEDADE A SER ANALISADA						
TRATAMENTOS	REPETIÇÕES					
	I	II	III	IV	V	VI
Traço 01 - 0% de fibras	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Traço 02 - 0,05% de fibras	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
Traço 03 - 0,10% de fibras	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
Traço 04 - 0,20% de fibras	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
Traço 05 - 0,40% de fibras	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
Traço 06 - 0,60% de fibras	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6

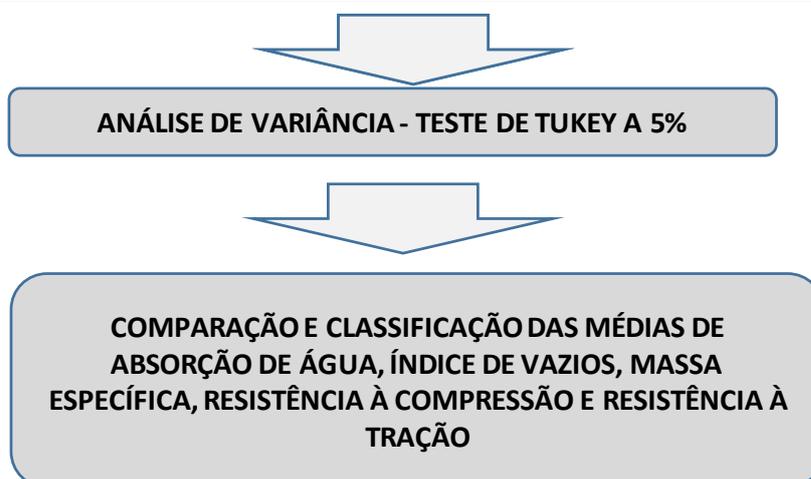


Figura 26 – Esquema do delineamento estatístico.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Produção da polpa celulósica do bambu

Os cavacos precisaram passar 2 vezes no moinho para triturar os fragmentos que “passavam” pelo moinho sem triturar, dessa forma, obteve-se um material fino e homogêneo, ideal para o objetivo de produzir as fibras em escala nanométrica (Figura 27).



**Figura 27.** Cavacos de bambu sendo triturados no moinho/Bambu após triturado.

Na etapa da deslignificação (Figura 28), observou-se mudança da coloração da polpa para marrom claro, e também uma redução da massa da amostra de cerca de 55%, ou rendimento de 45% após 4 lavagens e secagem da amostra, se aproximando do rendimento obtido por D'Almeida e Phillip (1988), que analisaram o rendimento da celulose no processo de fabricação de papel. Já Azzini et al. (1987) produziram polpa de bambu pelo processo Kraft e obtiveram 43,9% de rendimento. Correia (2011), produziu polpa celulósica de bambu pelo processo organossolve e obteve rendimento de 47,9%.

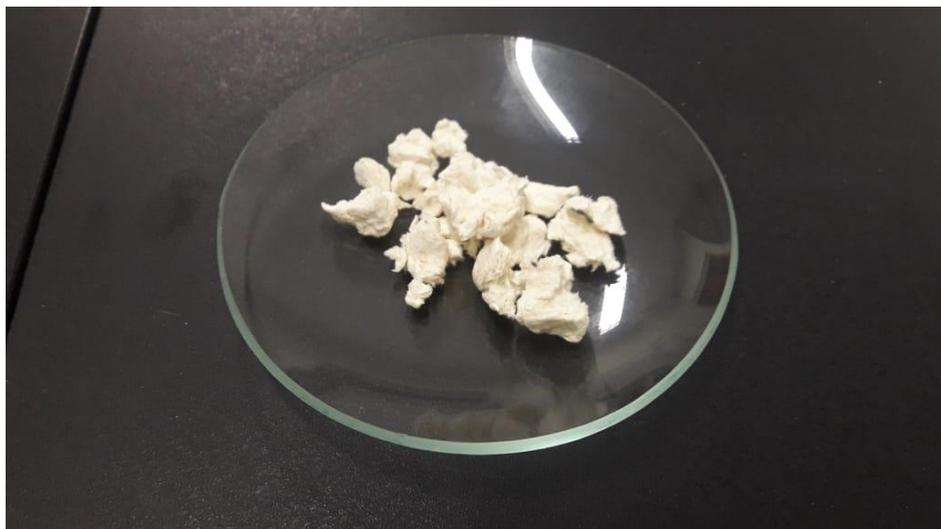


**Figura 28.** Deslignificação da polpa de bambu utilizando NaOH/Aspecto após deslignificação.

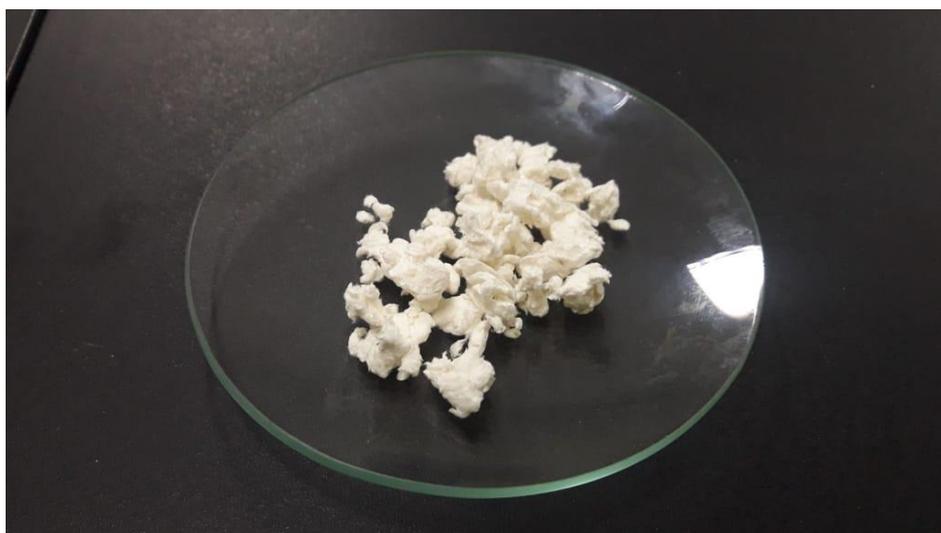
Na etapa de branqueamento (Figura 29, 30 e 31), onde ocorre além da remoção de componentes amorfos não retirados na etapa de deslignificação, também ocorre a descoloração da polpa para um tom muito claro, e também foi observado uma redução da massa da amostra de cerca de 6% a cada branqueamento, em relação à massa da amostra lavada 4 vezes com NaOH.



**Figura 29.** Branqueamento da polpa de bambu com  $H_2O_2$  e NaOH/Aspecto após 01 branqueamento.



**Figura 30.** Aspecto após 02 branqueamentos.



**Figura 31.** Aspecto após 03 branqueamentos.

## **4.2 Caracterização morfológica e química das polpas**

### **4.2.1 Determinação da composição química da polpa**

#### **4.2.1.1 Análise do teor de celulose**

A partir da análise do teor de celulose, foi constatado um teor significativo maior de hemicelulose e lignina remanescente nas amostras, que foi lavada apenas uma vez (método I), quando comparada aquela lavada quatro vezes (método II). Os valores apresentados foram 11,60% e 17,92% de hemicelulose e lignina, respectivamente, para o método I. Enquanto que o método II, apresentou 6,26% e 12,18%, respectivamente de teores de lignina e hemicelulose, como mostrado na tabela 06.

**Tabela 06.** Resultado da análise do teor de celulose a partir do método FDN/FDA.

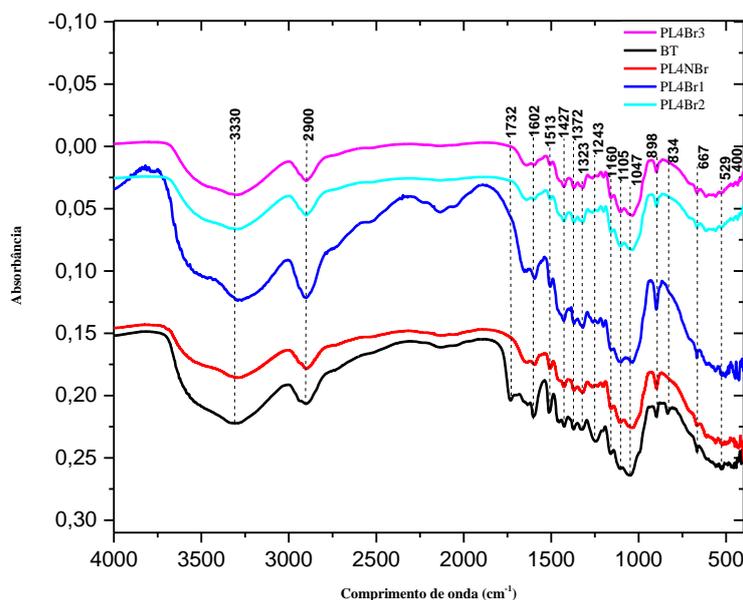
Amostras	Composição da Fibra Vegetal (%)					
	MS	FDN	FDA	Hemicelulose	Lignina	Celulose
PCBL1x	94,41	96,77	85,17	11,60	17,92	63,26
PCBL4x	94,00	99,70	93,45	6,26	12,18	78,88
PCBL4xB1x	94,42	99,75	93,62	6,13	8,59	84,83
PCBL4xB2x	93,09	99,85	92,52	7,33	4,17	86,08
PCBL4xB3x	93,94	99,55	93,96	5,60	4,25	88,33

A redução nos teores dos compostos amorfos observados entre os dois métodos de lavagem resultou em um expressivo rendimento da polpa de celulose entre os dois métodos de lavagem, que foi de 63,26% de celulose para o método I e 78,88 % para o método II. Correia (2011) obteve polpa não branqueada de bambu com 76,80% de celulose, teor que se aproxima do obtido pelo segundo método de lavagem.

Com isso, foi definido que o processo de branqueamento seria realizado apenas para essa última, descartando assim, o método que envolve apenas uma lavagem. A Tabela 06 mostra, ainda, que o teor de celulose aumentou conforme aumentava-se o número de vezes que a amostra passou por processo de branqueamento. A amostra PCBL4xB1x, que foi branqueada apenas uma vez, apresentou 84,83% de teor de celulose, enquanto que a PCBL4xB2x (branqueada duas vezes), apresentou 86,06 % e a branqueada três vezes (PCBL4xB3x) mostrou-se com o maior teor de celulose, 88,33 %. Correia et al. (2016) obtiveram polpa branqueada de bambu com teor de celulose de 90,2%, se aproximando do teor obtido neste trabalho com 3 branqueamentos.

#### **4.2.1.2 Determinação dos grupos funcionais e confirmação da redução do teor de lignina e hemicelulose por meio da espectroscopia Infravermelho com Transformada de Fourier**

A diminuição nos teores de lignina, hemicelulose e extrativos, acarretando o incremento no teor de alfa-celulose, foi comprovada através do ensaio de FTIR, que mostrou também uma diminuição na absorção máxima de água da amostra, após tratamentos realizados. A Figura 32 mostra as curvas obtidas para o bambu triturado e cada tipo de tratamento realizado. Estas curvas são resultadas das vibrações correspondentes às bandas destes elementos químicos na faixa de 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ .



**Figura 32.** Espectros de FTIR para as amostras de polpa celulósicas obtidas do bambu.

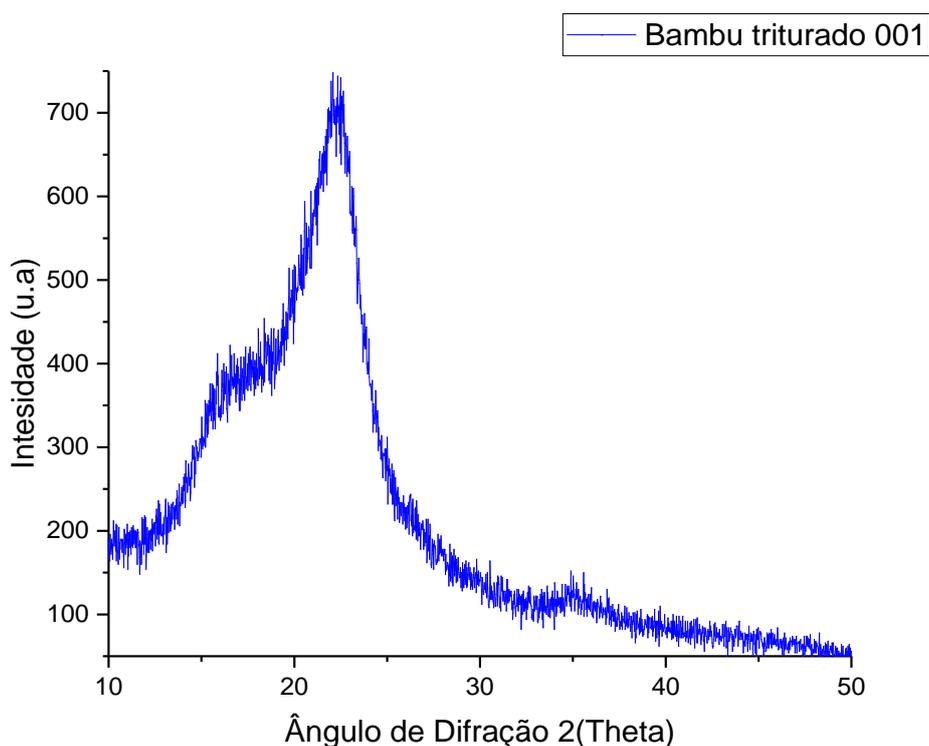
O pico de  $1.732\text{ cm}^{-1}$ , referente ao grupo acetil e carboxílicos das xilanas, desaparece com os tratamentos de polpação, confirmando a extração de lignina e extrativos da amostra. A queda dos teores de lignina, hemicelulose e de extrativos também é comprovada através da diminuição das bandas de  $1602\text{ cm}^{-1}$ , que representa vibrações no esqueleto aromático mais estiramento  $\text{C}=\text{O}$ , indicando diminuição no teor de polioses; em  $1.243\text{ cm}^{-1}$ , que representa deformação axial assimétrica de  $=\text{C}-\text{O}-\text{C}-$ , comum em meio onde está presente  $=\text{C}-\text{O}-$ , como em éster e éter; em  $1.372\text{ cm}^{-1}$ , referente à vibração de deformação do grupo  $\text{C}-\text{H}$ , devido a remoção de polissacarídeo de baixa massa molecular e  $1.513$  e  $1.427\text{ cm}^{-1}$ , relacionadas a vibração dos grupos aromáticos de lignina, específicas dos anéis do tipo guaiacílicos.

A diminuição da banda de  $3.330\text{ cm}^{-1}$  indica o sucesso da reação de esterificação na amostra e também na diminuição de umidade. O alargamento das bandas de  $898\text{ cm}^{-1}$  e  $1.047\text{ cm}^{-1}$  indica um incremento no valor do teor de alfa-celulose, enquanto o aumento da banda de  $1.160\text{ cm}^{-1}$  indica incorporação do grupo éster à polpa. A pequena diminuição na banda de  $1.323\text{ cm}^{-1}$  (anel guaiacil-siringílico de lignina) ocorreu, principalmente, devido ao tratamento de mercerização. A banda de  $2.900\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento vibracional simétrico e assimétrico de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  de grupos alifáticos, se tornou menor devido à remoção da hemicelulose.

### 4.2.1.3 Determinação da cristalinidade – DRX

Para a determinação da cristalinidade das amostras de bambu foi usado o método de Segal et al. (1959), onde o percentual cristalino foi determinado pela diferença da intensidade entre o pico de maior intensidade ( $I_c - I_a$ ) correspondente ao pico cristalino e o de menor intensidade ( $I_a$ ), característico do pico amorfo.

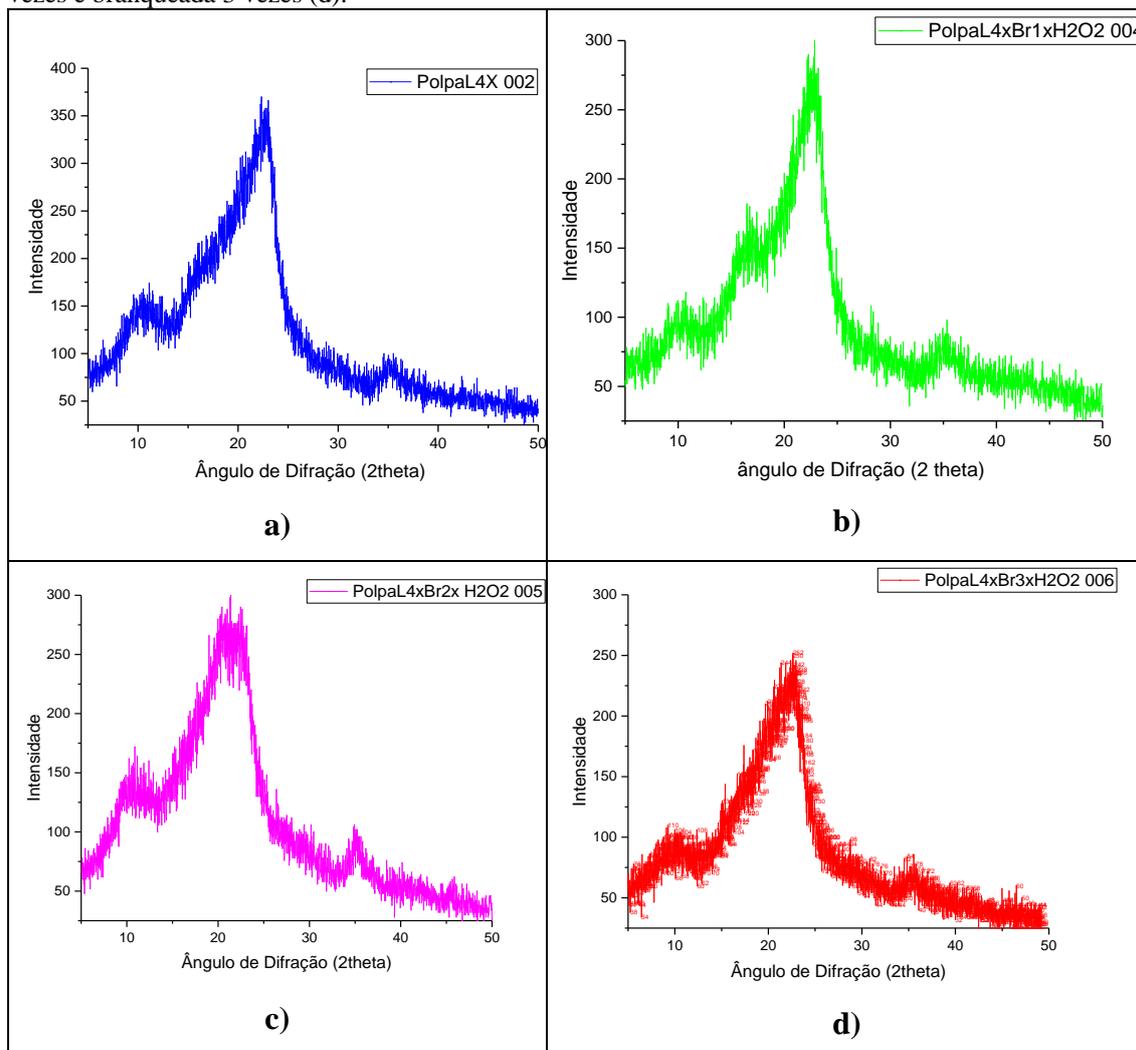
A partir da Figura 33, que mostra o espectro de DRX de uma amostra de bambu triturado sem nenhum processo de lavagem ou branqueamento, é possível observar a típica absorção das celuloses em  $2\theta$  próximo ao  $23^\circ$  de uma amostra completamente amorfa, visto que ainda não foram retirados da polpa os componentes amorfos como lignina e hemicelulose.



**Figura 33.** Difratograma de Raios-x do bambu triturado.

As intensidades dos picos cristalinos e do halo amorfo das polpas, foram obtidas através dos gráficos da Figura 34. Pode-se observar através das figuras 34a, 34b, 34c e 34d que os gráficos da celulose de bambu lavada 4 vezes (sem nenhum processo de branqueamento) e lavadas 4 vezes seguido de branqueamento 1, 2 e 3 vezes são característicos de celulose tipo II, onde o halo amorfo e o pico cristalino ficam situados entre os ângulos  $12^\circ \leq 2\theta \leq 13^\circ$  e  $22^\circ \leq 2\theta \leq 23^\circ$ .

**Figura 34.** Difratoograma de Raios-X da polpa de bambu lavada 4 vezes (a); DRX da polpa lavada 4 vezes e branqueada 1 vez (b); DRX da polpa lavada 4 vezes e branqueada 2 vezes (c) e DRX da polpa lavada 4 vezes e branqueada 3 vezes (d).



A partir da intensidade de absorção dos ângulos, foi determinado o índice de cristalinidade para as amostras. A Figura 34 (4a) mostra o gráfico de DRX da amostra de polpa de bambu lavada quatro vezes com hidróxido de sódio, onde foi detectado um percentual de 66,66% de índice de cristalinidade dessa amostra. Enquanto que a mesma polpa que foi branqueada uma vez com peróxido de hidrogênio (após as 4 lavagens), teve sua cristalinidade aumentada para 71,04% (Figura 34b). Esse aumento se repetiu nas polpas branqueadas duas e três vezes com o mesmo reagente, 76,19% e 79,47%, Figuras 34c e 34d, respectivamente. Com esse resultado, é possível endossar que o agente branqueador ataca de forma a eliminar os grupos amorfos da celulose, os quais são indesejáveis pois são facilmente deteriorados pela alcalinidade do cimento, e que os

índices de cristalinidades estão próximos aos encontrados nas polpas de Eucaliptos produzidos por (LENGOWSKI, 2012).

#### 4.2.1.4 Análise termogravimétrica – TGA

Devido as indicações de sucesso da polpação, as amostras foram submetidas a análise termogravimétrica (TGA). Essa análise visa aferir a estabilidade do material frente à variação de temperatura. É desejável sua realização pois os materiais de construção são expostos à ação das intempéries, assim o material deve apresentar boa durabilidade frente à ação do aumento de temperatura. O primeiro evento visualizado na análise TGA é a desidratação das amostras que ocorrem entre um intervalo médio de 43,8 °C e 108,6 °C, com uma perda de massa média de 6,18%.

A decomposição térmica ocorre em um pico médio de 356 °C, com temperatura onset em 334,4°C e endset em 362,2°C para as quatro amostras analisadas. A Perda de massa média foi de 80,51%. Na curva de TGA (Figura 35), fica evidente dois picos dos eventos endotérmicos que ocorreram na amostra.

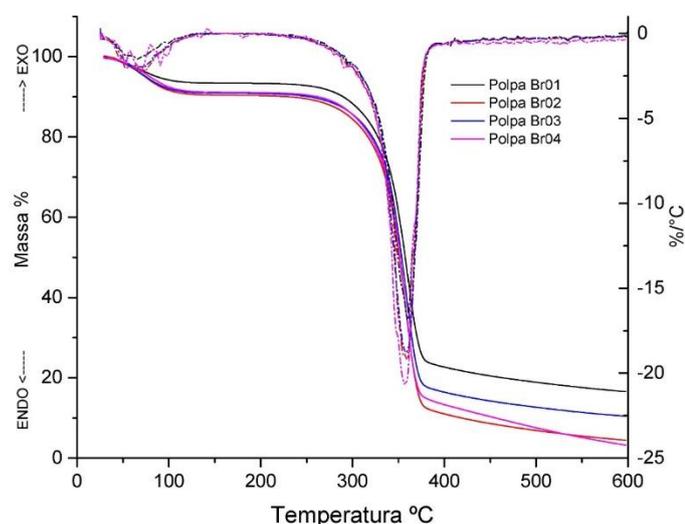
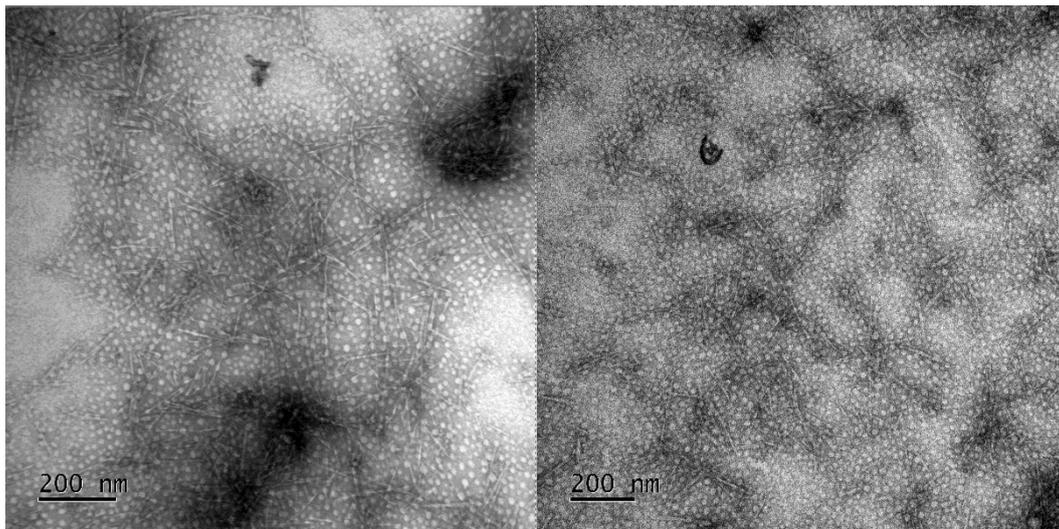


Figura 35. Curvas de TGA.

#### 4.2.2 Caracterização morfológica da polpa celulósica

Com a realização da Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), no Serviço de Microscopia Eletrônica do Instituto Gonçalo Moniz- IGM, FIOCRUZ-BA, foram obtidas 30 imagens da amostra de nanofibras de bambu para obtenção de seus comprimentos e diâmetros médios, sendo obtidos os valores de 137,31 nm e 6,79 nm, respectivamente, comprovando assim ter produzido as fibras em escala nanométrica, possuindo diâmetro entre 2 e 20 nm (CHEN et al., 2011). Correia et al. (2018) produziu

nanofibras celulósicas de bambu com diâmetro médio de 16,2 nm, também dentro dessa faixa nanométrica de diâmetro. A Figura 36 demonstra a microscopia realizada.



**Figura 36** – Imagens do MET das nanofibras celulósicas.

### 4.3. Confeção dos corpos de prova de argamassa

#### 4.3.1. Cimento Portland

O aglomerante utilizado foi o CP IV – 32, com peso específico de 2,80 g/cm<sup>3</sup> e cujas características são apresentadas na Tabela 07, fornecidas pela própria empresa.

**Tabela 07:** Boletim de ensaios com o cimento CPIV – 32.

Tipo de produto	Componentes (% em massa)		
	Clínquer + Gesso	Pozolana	Material Carbonático
CPIV	45 - 85	15 - 50	0 - 10

Fonte: Votorantim Cimentos, 2021.

#### 4.3.2. Agregado Miúdo

Para a realização do ensaio de composição granulométrica da areia do Rio Acre, utilizou-se o método descrito na ABNT NBR NM 248 (2003) com peneiras de série normal partindo da peneira 9,5 mm até a 0,075 mm.

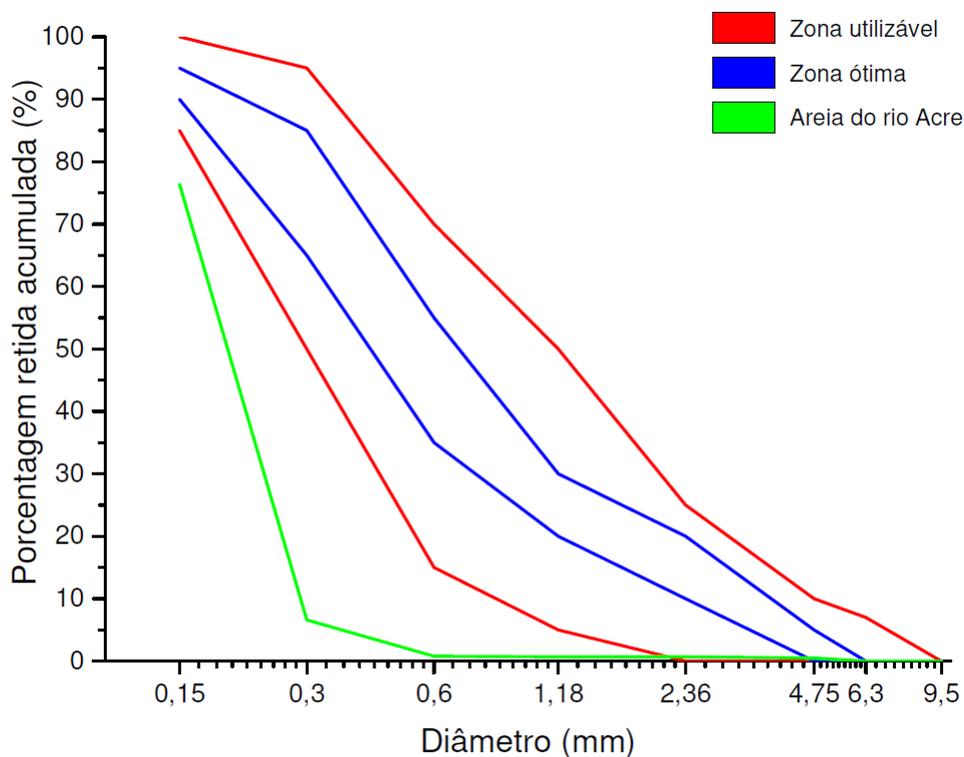
Foram ensaiadas cinco amostras de 500 g, de forma que o resultado médio das amostras é descrito na Tabela 08.

**Tabela 08:** Granulometria da areia do Rio Acre (Amostra média).

<b>Módulo de finura</b>	0,86
<b>Inchamento (%)</b>	39,6
<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,58

<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,29
<b>Diâmetro máximo (mm)</b>	0,60

Para uma melhor visualização da distribuição granulométrica média das amostras ensaiadas é apresentada a Figura 37, a qual compara a faixa granulométrica da areia do Rio Acre com as zonas utilizáveis e ótima descritas em norma.



**Figura 37:** Curva granulométrica da areia do Rio Acre (Amostra média).

Assim, analisando-se a Tabela 08 e a Figura 33, conclui-se que o percentual retido acumulado da média das amostras não se enquadra nos limites recomendados pela norma, uma vez que a areia ensaiada se encontra abaixo da zona considerada utilizável para concreto, possuindo graduação predominantemente abaixo da peneira 0,15 mm e diâmetro máximo de 6,3 mm. Além disso, ao se avaliar o módulo de finura (1,96), constata-se que a areia do Rio Acre é classificada como areia muito fina, característica essa que faz com que necessite de mais água para atingir a trabalhabilidade necessária em comparação à areia da faixa normal de granulometria (CAMARGO & MOREIRAS, 2017)

#### **4.3.3. Adição de nanofibras de bambu**

De acordo com o explicitado em Materiais e Métodos, foram utilizados como referência, os teores de adição de nanofibras testados por Onuaguluchi et al (2014), e

adicionados o teor de 0,60%, para maior abrangência de testagem no presente estudo. A Tabela 09 mostra a massa de nanofibras adicionada em cada traço.

**Tabela 09:** Adição de nanofibras em cada tipo de traço.

<b>Traço</b>	<b>Adição de nanofibras (g)</b>
Traço 01 – 0% (controle)	0
Traço 02 – 0,05%	0,312
Traço 03 – 0,10%	0,624
Traço 04 – 0,20%	1,248
Traço 05 – 0,40%	2,496
Traço 06 – 0,60%	3,744

#### 4.4. Dosagem e mistura da argamassa

A dosagem da argamassa seguiu o demonstrado na Tabela 10.

**Tabela 10:** Quantidade de materiais por amassamento.

	<b>TRAÇO POR AMASSAMENTO (Kg)</b>			
	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Água</b>	<b>Nanofibras</b>
<b>Traço 01 – 0%</b>	0,624	1,872	0,300	0
<b>Traço 02 – 0,05%</b>	0,624	1,872	0,300	0,312
<b>Traço 03 – 0,10%</b>	0,624	1,872	0,300	0,624
<b>Traço 04 – 0,20%</b>	0,624	1,872	0,300	1,248
<b>Traço 05 – 0,40%</b>	0,624	1,872	0,300	2,496
<b>Traço 06 – 0,60%</b>	0,624	1,872	0,300	3,744

Os materiais foram pesados e separados para posterior mistura na argamassadeira, conforme Figura 38.



**Figura 38:** Pesagem dos materiais componentes da argamassa.

As amostras foram moldadas e após 24 h retiradas dos moldes para cura úmida em tanque de água por 28 dias para então realizar os testes físicos e mecânicos.

#### 4.5. Testes Físicos

Com a medição da massa seca (Figura 39) obtida após 72 h de secagem em estufa (Figura 40), massa saturada, obtida após retirada das amostras do tanque de cura e massa submersa, com utilização de balança hidrostática (Figura 41), foram obtidas as propriedades físicas das amostras de argamassa.



**Figura 39:** Balança para pesagem da massa seca e saturada das amostras de argamassa.



**Figura 40:** Secagem das amostras de argamassa em estufa.



**Figura 41:** Pesagem das amostras de argamassa submersas.

#### 4.7.1. Absorção de água

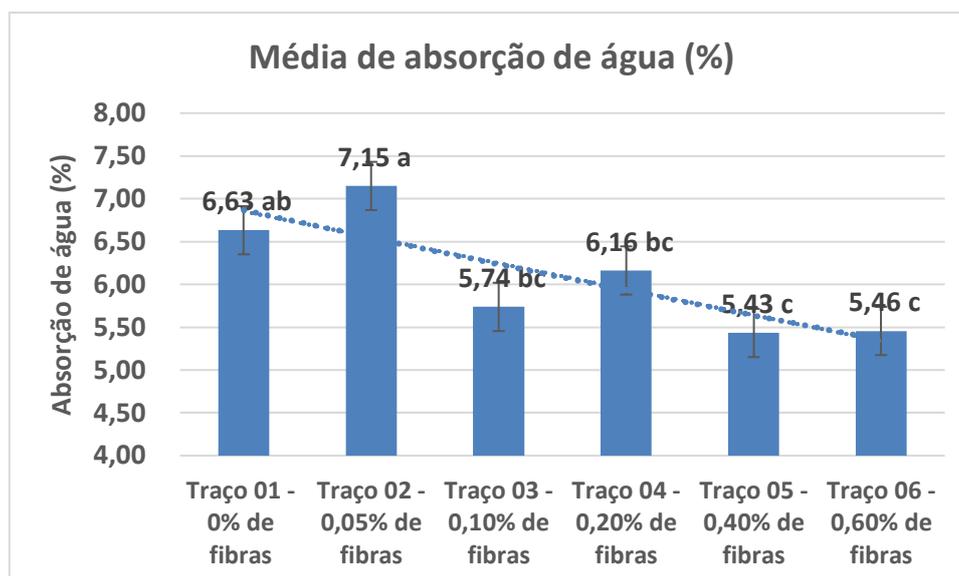
Os valores obtidos para o teor de absorção de águas das amostras com 28 dias de cura estão listados na Tabela 11.

**Tabela 11:** Absorção de água das amostras a 28 dias de cura.

Absorção de água (%)						
TRATAMENTOS	REPETIÇÕES					
	I	II	III	IV	V	VI
<b>Traço 01 - 0% de fibras</b>	5,85	5,81	6,76	7,49	7,56	6,33
<b>Traço 02 - 0,05% de fibras</b>	6,67	7,10	7,65	6,70	6,35	8,42
<b>Traço 03 - 0,10% de fibras</b>	5,89	5,85	5,39	6,26	5,52	5,51
<b>Traço 04 - 0,20% de fibras</b>	5,79	6,20	6,16	5,84	6,42	6,57
<b>Traço 05 - 0,40% de fibras</b>	5,13	5,67	6,51	4,94	5,34	5,01
<b>Traço 06 - 0,60% de fibras</b>	5,54	5,29	5,12	5,59	5,37	5,83

Atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, realizou-se a ANOVA e foi obtido p-valor menor que 0,05, aceita-se a hipótese de diferenças significativas da absorção de água nos diferentes traços testados e assim seguiu-se com a realização do teste de Tukey para comparação das médias a 5% de significância.

Na comparação das médias de Absorção de Água dos traços testados (Figura 42), temos que as dosagens de 0,05% e 0%; 0%, 0,20% e 0,10%; 0,20%, 0,10%, 0,60% e 0,40%; possuem médias semelhantes estatisticamente, com a dosagem de 0,40% sendo a menor média de absorção de água, sendo 22% menor que o traço sem nanofibras.



**Figura 42:** Médias de absorção de água para os diferentes traços testados.

\*Grupos com a mesma letra não diferem significativamente em relação à suas médias, de acordo com o teste de Tukey ( $\alpha=5\%$  de significância)

**Tabela 12:** Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Absorção de água.

Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão			
Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Traço 01 - 0% de fibras	0,4223906	0,7730926	2,6940396
Traço 02 - 0,05% de fibras	0,4185173	0,7660033	2,6693352
Traço 03 - 0,10% de fibras	0,1765735	0,3231788	1,1261994
Traço 04 - 0,20% de fibras	0,168759	0,308876	1,0763579
Traço 05 - 0,40% de fibras	0,321288	0,5880467	2,0491996
Traço 06 - 0,60% de fibras	0,1362269	0,2493331	0,8688653

#### 4.7.2. Índice de vazios

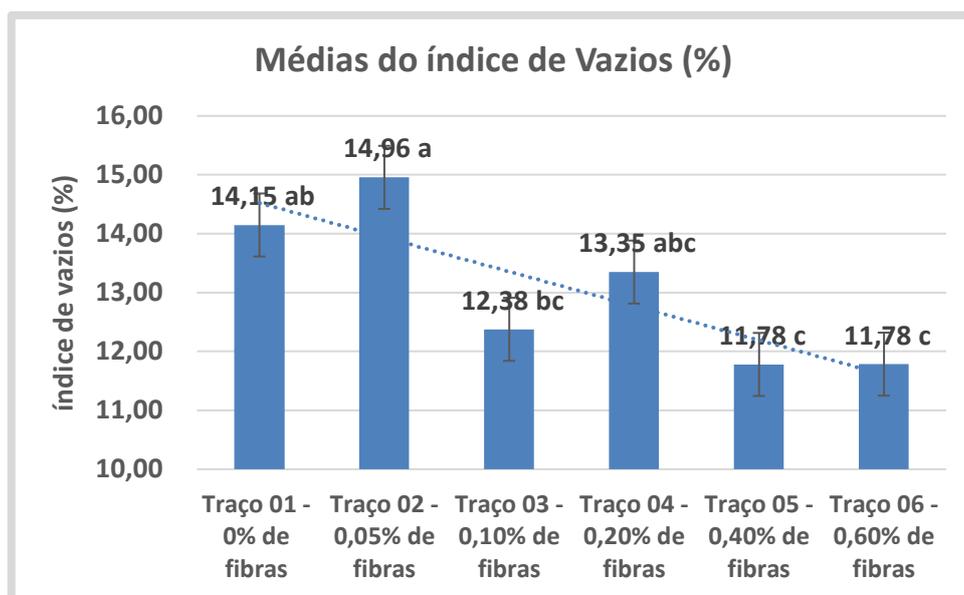
Os valores obtidos para o Índice de Vazios das amostras com 28 dias de cura estão listados na Tabela 13.

**Tabela 13:** Índice de vazios das amostras a 28 dias de cura.

Índice de vazios (%)						
TRATAMENTOS	REPETIÇÕES					
	I	II	III	IV	V	VI
Traço 01 - 0% de fibras	12,54	12,42	14,60	15,71	16,12	13,48
Traço 02 - 0,05% de fibras	14,04	14,87	15,87	13,83	13,66	17,46
Traço 03 - 0,10% de fibras	12,79	12,58	11,51	13,31	12,02	12,03
Traço 04 - 0,20% de fibras	12,53	13,29	13,12	12,61	13,84	14,69
Traço 05 - 0,40% de fibras	11,15	12,35	13,75	10,91	11,64	10,88
Traço 06 - 0,60% de fibras	11,85	11,54	10,94	12,15	11,66	12,57

Atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, realizou-se a ANOVA e foi obtido p-valor menor que 0,05, aceita-se a hipótese de diferenças significativas do Índice de Vazios nos diferentes traços testados e assim seguiu-se com a realização do teste de Tukey para comparação das médias a 5% de significância.

De acordo com os intervalos e desvio padrão da Tabela 14, foi realizada a comparação das médias do Índice de Vazios dos traços testados (Figura 43), temos que as dosagens de 0,05%, 0% e 0,20%; 0%, 0,20% e 0,10%; 0,20%, 0,10%, 0,60% e 0,40% possuem médias semelhantes estatisticamente, com a dosagem de 0,40% sendo a menor média de índice de Vazios, sendo 17% menor que o traço sem nanofibras.



**Figura 43:** Médias de Índice de Vazios para os diferentes traços testados.

\*Grupos com a mesma letra não diferem significativamente em relação à suas médias, de acordo com o teste de Tukey ( $\alpha=5\%$  de significância)

**Tabela 14:** Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Índice de Vazios.

Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão			
Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Traço 01 - 0% de fibras	0,8646694	1,5825861	5,514928
Traço 02 - 0,05% de fibras	0,8071505	1,4773104	5,148068
Traço 03 - 0,10% de fibras	0,3519644	0,644193	2,244856
Traço 04 - 0,20% de fibras	0,4450965	0,8146507	2,83886
Traço 05 - 0,40% de fibras	0,6088323	1,1143328	3,883179
Traço 06 - 0,60% de fibras	0,303918	0,5562546	1,938412

### 4.7.3. Massa específica

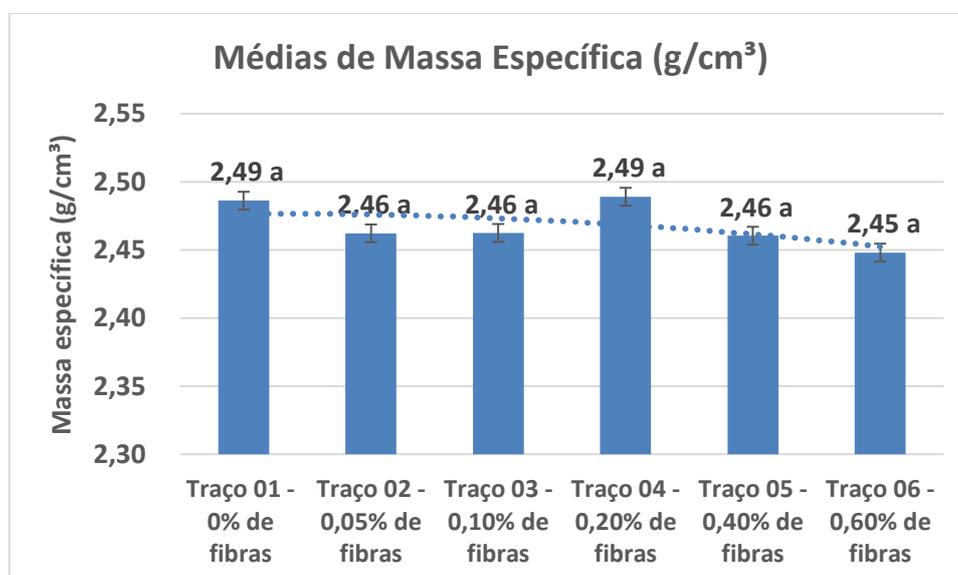
Os valores obtidos para a Massa Específica das amostras com 28 dias de cura estão listados na Tabela 15.

**Tabela 15:** Massa Específica das amostras a 28 dias de cura.

Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )						
TRATAMENTOS	REPETIÇÕES					
	I	II	III	IV	V	VI
<b>Traço 01 - 0% de fibras</b>	2,45	2,44	2,53	2,49	2,54	2,46
<b>Traço 02 - 0,05% de fibras</b>	2,45	2,46	2,47	2,40	2,49	2,51
<b>Traço 03 - 0,10% de fibras</b>	2,49	2,46	2,41	2,45	2,47	2,48
<b>Traço 04 - 0,20% de fibras</b>	2,47	2,47	2,45	2,47	2,50	2,53
<b>Traço 05 - 0,40% de fibras</b>	2,45	2,48	2,45	2,48	2,46	2,44
<b>Traço 06 - 0,60% de fibras</b>	2,43	2,47	2,40	2,47	2,46	2,47

Atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, realizou-se a ANOVA e foi obtido p-valor menor que 0,05, rejeita-se a hipótese de diferenças significativas de Massa Específica nos diferentes traços testados e assim seguiu-se com a realização do teste de Tukey para comparação das médias a 5% de significância.

De acordo com os intervalos e desvio padrão da Tabela 16, foi realizada a comparação das médias dos resultados (Figura 44), todos os traços testados possuem médias de Massa Específica semelhantes, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, não havendo diferenças significativas entre os mesmos.



**Figura 44:** Médias de Massa Específica para os diferentes traços testados.

\*Grupos com a mesma letra não diferem significativamente em relação à suas médias, de acordo com o teste de Tukey ( $\alpha=5\%$  de significância).

**Tabela 16:** Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Massa específica

<b>Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão</b>			
<b>Fator</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Limite Superior</b>
Traço 01 - 0% de fibras	0,022864958	0,04184925	0,14583445
Traço 02 - 0,05% de fibras	0,021792971	0,03988721	0,13899724
Traço 03 - 0,10% de fibras	0,015242301	0,02789766	0,09721656
Traço 04 - 0,20% de fibras	0,021033381	0,03849695	0,13415251
Traço 05 - 0,40% de fibras	0,009999429	0,01830174	0,06377712
Traço 06 - 0,60% de fibras	0,016020399	0,0293218	0,10217933

## 4.8. Testes Mecânicos

### 4.8.1. Equipamento utilizado

O equipamento FORTEST FT02® funciona por sistema hidráulico à óleo, tem capacidade para 100 toneladas de carga, foi programado para registrar os picos de carga em cada ensaio, e também foram utilizadas bases com Neoprene para acomodação dos corpos de prova.

### 4.8.2. Resistência à compressão

Os valores obtidos para a Resistência à Compressão das amostras com 28 dias de cura estão listados na Tabela 17.

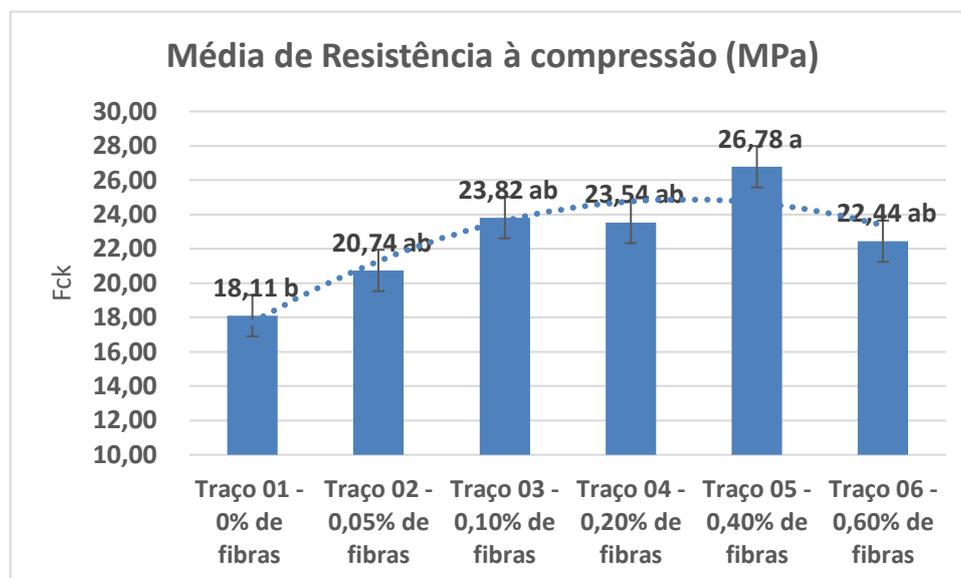
**Tabela 17:** Resistência à compressão das amostras a 28 dias de cura.

<b>Resistência à compressão - Fck (Mpa)</b>						
<b>TRATAMENTOS</b>	<b>REPETIÇÕES</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Traço 01 - 0% de fibras</b>	19,71	16,99	21,60	17,59	14,16	18,59
<b>Traço 02 - 0,05% de fibras</b>	23,27	22,73	21,88	23,08	11,74	21,73
<b>Traço 03 - 0,10% de fibras</b>	20,42	26,62	27,12	27,97	13,69	27,07
<b>Traço 04 - 0,20% de fibras</b>	22,72	20,18	27,97	20,89	25,14	24,31
<b>Traço 05 - 0,40% de fibras</b>	20,24	30,69	25,26	28,74	28,15	27,62
<b>Traço 06 - 0,60% de fibras</b>	14,63	22,98	23,13	26,47	23,47	23,97

Atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, realizou-se a ANOVA e foi obtido o p-valor menor que 0,05, aceitou-se a hipótese de diferenças significativas do Fck nos diferentes traços testados e assim seguiu-se com a realização do teste de Tukey para comparação das médias a 5% de significância.

De acordo com os intervalos e desvio padrão da Tabela 18, foi realizada a comparação das médias de Resistência à Compressão dos traços testados (Figura 45),

temos que as dosagens de 0,40%, 0,10%, 0,20%, 0,60%, 0,05% de nanofibras, possuem médias semelhantes estatisticamente, com a dosagem de 0,40% sendo a maior média, sendo 47% maior que o traço sem nanofibras.



**Figura 45:** Médias de Resistência à compressão para os diferentes traços testados.

\*Grupos com a mesma letra não diferem significativamente em relação à suas médias, de acordo com o teste de Tukey ( $\alpha=5\%$  de significância)

**Tabela 18:** Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Resistência à compressão.

Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão			
Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Traço 01 - 0% de fibras	138%	2,531925	8,823144
Traço 02 - 0,05% de fibras	2,431563	4,450438	15,508694
Traço 03 - 0,10% de fibras	3,097646	5,669555	19,757021
Traço 04 - 0,20% de fibras	1,579016	2,89004	10,071086
Traço 05 - 0,40% de fibras	1,996185	3,653576	12,731823
Traço 06 - 0,60% de fibras	2,204071	4,034065	14,057736

Hisseine et al. (2019), obtiveram Resistência à Compressão 26% maior que o traço sem nanofilamentos de celulose, sendo esses resultados obtidos com teores de nanofilamentos de 0,05% e 0,10%, em massa, em relação à massa do cimento. Já Jiao et al. (2016) obtiveram uma resistência à compressão 20% maior que o traço sem nanofibras, com adição de 0,15%, em massa de nanofibras, em relação à massa do cimento. Estes ganhos foram menores que o obtido neste trabalho, porém vários fatores podem ter influenciado, como a fonte vegetal e o processo de produção das nanofibras celulósicas, o tipo de cimento utilizado, o tipo de agregado e o método de produção dos corpos de prova de argamassa, que costumam variar a cada pesquisa realizada.

### 4.8.3. Resistência à tração

Os valores obtidos para a Resistência à Tração das amostras com 28 dias de cura estão listados na Tabela 19.

Tabela 19: Resistência à tração das amostras a 28 dias de cura.

Resistência à tração - Fct (Mpa)						
TRATAMENTOS	REPETIÇÕES					
	1	2	3	4	5	6
Traço 01 - 0% de fibras	2,50	2,04	2,04	2,69	2,34	2,49
Traço 02 - 0,05% de fibras	2,48	2,20	1,98	2,12	2,17	2,11
Traço 03 - 0,10% de fibras	2,73	2,70	2,35	2,46	2,33	2,72
Traço 04 - 0,20% de fibras	2,78	2,28	3,06	2,58	2,83	3,01
Traço 05 - 0,40% de fibras	3,41	2,90	2,51	2,91	3,51	2,58
Traço 06 - 0,60% de fibras	2,53	2,51	2,68	2,52	3,02	2,66

Atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, realizou-se a ANOVA e foi obtido o p-valor menor que 0,05, aceita-se a hipótese de diferenças significativas da Resistência à tração nos traços testados e assim seguiu-se com a realização do teste de Tukey para comparação das médias a 5% de significância.

De acordo com os intervalos e desvio padrão da Tabela 20, foi realizada a comparação das médias de Resistência à Tração dos traços testados (Figura 46), temos que as dosagens de 0,40%, 0,20%, 0,60% e 0,10% de nanofibras, possuem médias semelhantes estatisticamente, assim como as dosagens de 0% e 0,05% também são semelhantes entre si, com a dosagem de 0,40% sendo a maior média, sendo 26% maior que o traço sem nanofibras.

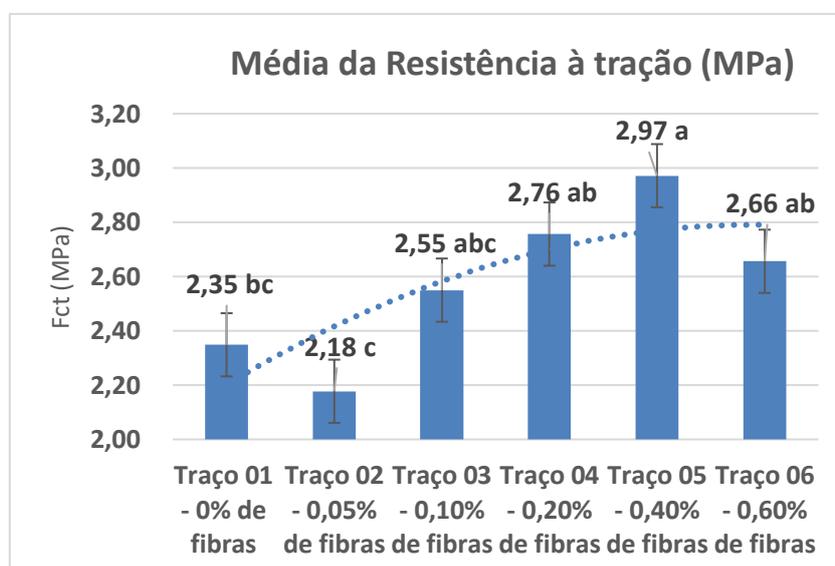


Figura 46: Médias de Resistência à Tração para os diferentes traços testados.

\*Grupos com a mesma letra não diferem significativamente em relação à suas médias, de acordo com o teste de Tukey ( $\alpha=5\%$  de significância)

**Tabela 20:** Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão – Resistência à tração.

<b>Intervalos de Confiança para o Desvio-padrão</b>			
<b>Fator</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Limite Superior</b>
Traço 01 - 0% de fibras	0,14530968	0,2659572	0,9267962
Traço 02 - 0,05% de fibras	0,09181462	0,1680463	0,5856006
Traço 03 - 0,10% de fibras	0,10420907	0,1907317	0,6646534
Traço 04 - 0,20% de fibras	0,15910682	0,2912098	1,0147954
Traço 05 - 0,40% de fibras	0,22542561	0,4125917	1,4377818
Traço 06 - 0,60% de fibras	0,10568823	0,1934389	0,6740876

Para comparação com outros autores, que comumente estudam a tração na flexão, os valores obtidos para tração por compressão diametral serão transformados pela fórmula proposta por Hammitt (1971) (Equação 06):

$$f_{ct, f} = 1,02 f_{ct, cp} + 1,48 \text{ MPa} \quad (06)$$

Onde:

$f_{ct, f}$  = Resistência à tração na flexão (MPa)

$f_{ct, cp}$  = Resistência à tração por compressão diametral (MPa)

Convertendo os valores para resistência à tração na flexão, temos que o traço com 0,40% de nanofibras apresentou resistência 16,40% maior que o traço sem nanofibras.

Jiao et al. (2016) obtiveram na dosagem de 0,15% de nanofibras em relação à massa de cimento, um aumento de 15% na resistência à flexão, em comparação ao traço sem nanofibras, com adição de 0,15%, em massa de nanofibras, em relação à massa do cimento. Hisseine et al (2019) obtiveram aumento de 21% na resistência à flexão, em comparação ao traço sem adição de nanofibras, sendo esses resultados obtidos com teores de nanofilamentos de 0,05% e 0,10%, em massa, em relação à massa do cimento.

Os ganhos de resistência à flexão da pesquisa e da bibliografia são bem próximos, apesar de utilizarem fonte de fibras celulósicas diferentes, utilizarem cimento e agregados diferentes, métodos de moldagem diferentes, o que torna cada pesquisa única. Mesmo assim os resultados demonstram grande potencial de utilização das fibras vegetais como reforço de materiais compósitos.

## CONCLUSÕES

Na produção das nanofibras de bambu, as análises do teor de celulose pelo método FDN/FDA revelaram que o método de lavagem, quatro vezes, das amostras de bambu triturado, com solução de hidróxido de sódio foi significativamente mais eficiente para remoção dos compostos amorfos das amostras, o que é desejável para o uso em materiais à base de cimento, já que os amorfos são facilmente degradados quimicamente pelo cimento. Se comparado com o método que usou apenas uma lavagem com hidróxido de sódio. Na prática o teor remanescente de lignina e hemicelulose nas amostras lavadas apenas uma vez foi 11,60% e 17,92%, respectivamente e 6,26% e 12,18%, respectivamente para a lavada quatro vezes. Essas diferenças impactaram o rendimento final (Teor de celulose) na produção da polpa de 63,26% (lavada apenas uma) para 78,88% (lavada quatro vezes).

O branqueamento das amostras lavadas quatro vezes aumentou o teor de celulose conforme se aumentava o número de vezes que as amostras foram branqueadas. Assim, a amostra que foi branqueada apenas uma vez, apresentou 84,83% de teor de celulose, enquanto que a branqueada duas vezes apresentou 86,06% e a branqueada três vezes mostrou-se com o maior teor de celulose, 88,33%. Em síntese, quanto maior for o número de vezes de lavagem e de branqueamento das amostras de bambu triturado, maior o teor final de celulose, tornando assim as fibras resistentes ao ataque químico do cimento. Essa teoria foi endossada a partir das análises dos dados de FTIR que revelaram a diminuição nos teores de lignina, hemicelulose e extrativos, acarretando o incremento no teor de alfa-celulose, que mostrou também, uma diminuição na absorção máxima de água da amostra, após tratamentos realizados.

As análises dos difratogramas de raio-X reforçaram essa tese ao revelar os índices de cristalinidade das amostras em 66,66%, 71,04%, 76,19% e 79,47% para as amostras lavadas quatro vezes (sem branqueamento) e lavadas quatro vezes e branqueadas uma, duas e três vezes com peróxido de sódio, respectivamente.

A análise TGA revelou o comportamento semelhante para todas as amostras, de modo que todas elas se mostraram relativamente estáveis se comparada com as outras de mesma natureza. A desidratação das amostras ocorreu em um intervalo médio de 43,8 °C e 108,6 °C, com uma perda de massa média de 6,18%. A decomposição térmica ocorreu em um pico médio de 356 °C, com temperatura onset em 334,4 °C e endset em 362,2 °C para as quatro amostras analisadas. A Perda de massa média foi de 80,51%.

Em suma, a polpação do bambu amazônico se mostrou um recurso eficiente para produção de polpa celulósica, que pode ser útil para produção de materiais compósitos, agindo como elemento de reforço e assim substituir outras plantas fornecedoras de fibras celulósicas que causam impactos ambientais mais severos.

Quanto aos testes físicos realizados nos corpos de prova de argamassa, os compósitos produzidos com 0,40% de nanofibras apresentaram teores de absorção de água e índice de vazios significativamente melhores que os compósitos sem nanofibras, ou seja, para a aplicação em compósitos cimentícios, ter uma menor absorção de água e menor índice de vazios é uma característica desejável, haja vista ao caráter agressivo da água frente aos materiais à base do cimento, tanto a água por si só pela ação da umidade, como também por outras substâncias agressivas que podem estar dissolvidas na água..

As propriedades mecânicas obtiveram seu melhor desempenho nos compósitos reforçados com 0,40% de nanofibras, obtendo resultados de Resistência à Compressão e à Tração Indireta por Compressão Diametral significativamente maiores que os compósitos sem nanofibras.

Diante de todas as caracterizações e ensaios realizados com as nanofibras, elas se mostraram um produto nanotecnológico promissor, e além dos bons resultados alcançados como reforço do compósito cimentício, também inova por utilizar uma fonte de celulósica diferente das utilizadas tradicionalmente, um bambu nativo da Amazônia Sul Ocidental, abrindo precedentes para mais pesquisas utilizando o mesmo para as mais diversas aplicações tecnológicas. Apresentamos um trabalho pioneiro no estado de Acre na área de nanotecnologia com a preparação de um novo material nanoestruturado com potencial aplicação na engenharia civil.

## **PERSPECTIVAS**

Como forma de aprofundar a pesquisa, pretende-se realizar mais ensaios e caracterizações, como microscopia eletrônica dos corpos de prova com nanofibras, objetivando visualizar a interação delas com a argamassa. Também pretende-se realizar ensaio objetivando aferir as propriedades mecânicas e físicas das nanofibras. Outros ensaios mecânicos dos corpos de prova de argamassa também seriam enriquecedores, como tração na flexão direta e módulo de elasticidade.

Esses complementos serão de suma importância para solidificar ainda mais os resultados obtidos até então.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland. Boletim Técnico – BT 106.** São Paulo, ABCP, 2002, 27p.

ABDELMOULEH, M. et al. Modification of cellulosic fibers with functionalized silanes: development of surface properties. **International Journal of Adhesion and Adhesives.** v.24, n. 1, p. 43–54, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações.** ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** ABNT, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica.** ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos.** ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISO 3310-1. Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** ABNT, 2010.

ABU-LEBDEH, T. M.; FINI, E.; LUMPKIN, M. Flexural and tensile characteristics of micro fiber-reinforced very high strength concrete thin panels. **American Journal of Engineering and Applied Science.** v. 5, p. 184-197, 2012.

AFIFY, A. S. et al. Elaboration and characterization of novel humidity sensor based on micro-carbonized bamboo particles. **Sensors and Actuators. B, Chemical**. v. 239, p. 1251 – 1256, 2017.

AFONSO, D. G. 2011. **Bambu nativo (*Guadua spp.*): alternativa de desenvolvimento econômico e sustentável para o Estado do Acre**. 49 f. Trabalho de conclusão de curso de pós-graduação (Pós-Graduação em Gestão da Indústria Madeireira) - Departamento de Economia Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fiber – cement based materials in São Paulo: an overview. **Cement and Concrete Composites**. v. 27, p. 527 – 536, 2005.

ALMEIDA, A.E.F.S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age, **Cement and Concrete Composites**. v. 42, p. 49–58, 2013.

ARDANUY M. et al. (2012). Nanofibrillated cellulose (NFC) as a potential reinforcement for high performance cement mortar composites. *BioResources*. v.3, p. 3883–3894, 2012.

ARSÈNE M. A. et al. Cementitious composites reinforced with vegetable fibers. In: **Proceedings of the first Interamerican conference on non-conventional materials and technologies in the eco-construction and Infrastructure**. In: 13–16 November 2003, João- Pessoa Brazil, IAC-NOCMAT 2003, proceedings.

AZIZ, M. A. et al. Prospects for natural fiber reinforced concretes in construction, **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**. v. 3, n. 2, p. 123-132, 1981.

BARRICHELLO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. B. Deslignificação alcalina rápida para produção de celulose química de *Bambusa vulgaris*. **IPEF**. v. 11, p. 83-90, 1975.

BASTOS, P. L. S. **Estruturas de concreto armado**. Apostila da disciplina Estruturas de Concreto I. Bauru, UNESP, 2014.

BATTAGIN, A.F. Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v.1, p.184-232, 2011.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 5a ed., 2v, 2000.

BERGE B. et al. **The ecology of building materials**. 2nd ed. Burlington: Architectural Press, 2009, 448 p.

BIANCHINI, Milton Carlos. 2005. **Florestas dominadas por bambu (gênero *Guadua*) no sudoeste da Amazônia: extensão, comportamento espectral e associação com o relevo**. 88f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade do Amazonas, Manaus, 2005.

BILCATI, Gêssica Katalyne. **Produção de painéis de cimento portland reforçados com fibra de curauá (*Ananas erectifolius*)**. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BRANDT A. Fiber reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**. v. 86, p. 3-9, 2008.

BRESCANSIN, Janaína. **Comportamento à fratura de compósitos de matriz cimentícia reforçada com polpa de bambu**. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering – An Introduction**, 3<sup>a</sup>ed, New York, John Wile & Sons, 1994.

CAMARGO, D. J.; MOREIRAS, S. T. F. Estudo da influência granulométrica do agregado miúdo para uso em argamassas de revestimento. In: 26 Encontro anual de iniciação científica, 2017. Anais... Maringá: UEM, 2017.

CAMPBELL, M. M.; SEDEROFF, R. R. Variation in lignin content and composition. **Plant Physiology**. v. 110, p. 3-13, 1996.

CAMPELLO, E. F., et al. On the fatigue behavior of bamboo pulp reinforced cementitious composites. **Procedia Structural Integrity**. v. 2, p. 2929-2935, 2016.

CARMO, L. F. Z. et al. Ocorrência, biomassa, perdas e exploração de bambu em florestas da Amazônia no Acre, Brasil. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia. Rio de Janeiro: ICH, 2017. 655 p.

CARVALHO, A. L. et al. Bamboo-dominated forests of the Southwest Amazon: detection, spatial extent, life cycle length and flowering waves. **Plos One**. v. 8, n. 1, p.e 54852, 2013.

CASTELLANO M. et al. Modification of cellulose fibers with organosilanes: under what conditions does coupling occur? **Journal of Colloid and Interface Science**. v. 273, n. 2, p. 505-511, 2004.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. v. 55, p. 18-32, 2009.

CHEN, W. et al. Isolation and characterization of cellulose fibers using a chemical ultrasonic process. **Cellulose**. v.18, p.433-442, 2011.

CHERIAN, B. M. et al. Novel Method for the Synthesis of Cellulose Nanofibril Whiskers from Banana Fibers and Characterization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 56, n. 14, p. 5617-5627, 2008.

CINCOTTO, M.A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.381-413.

CORDEIRO, E. M. S. et al. Extração e caracterização de nanocelulose de fibras do pseudocaule da bananeira. In: Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, 5, 2014. Maceió . **Anais...** p. 1-8.

CORREIA, V. C. **Produção e caracterização de polpa organossolve de bambu para reforço de matrizes cimentícias**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em zootecnia e qualidade de alimentos) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2011.

CORREIA, V. C. et al. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber–cement materials. **Construction and Building Materials**. v. 72, p. 65 – 71, 2014.

CORREIA, V. C. et al. Grinding process for the production of nanofibrillated cellulose based on unbleached and bleached bamboo organosolv pulp. **Cellulose**. v. 23, p. 2971–2987, 2016.

CORREIA, V. C. et al. Nanofibrillated cellulose and cellulosic pulp for reinforcement of the extruded cement based materials. **Construction and Building Materials**. v. 160, p. 376–384, 2018.

COSTA, E. B. et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**. v. 13, n. 2, p. 75-86, 2013.

COUTTS, R. S. P. Autoclaved bamboo pulp fiber reinforced cement. **Cement and Concrete Composites**. v. 17, p. 99–106, 1995.

CZAJA, W. K. et al. The future prospects of microbial cellulose in biomedical applications. **Biomacromolecules**. v. 8, p. 1–12, 2007.

D'ALMEIDA, M. L. O.; PHILIPP, P. Caracterização química e físico-química de materiais lignocelulósicos. In: **Celulose e papel - Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: SENAI-IPT, 1988. 20 p.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições minerais. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.261-309.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: Para Engenharia e Ciências**. São Paulo> Cengage Learning. 2006. 692 p.

VIEIRA, S. Análise de Variância (ANOVA). São Paulo: Atlas, 2006. 201 p.

EICHHORN, S.J. et al. Review: current international research into cellulose nanofibers and nanocomposites. **Journal of Materials Science**. v.45, p.1-33, 2010.

FARUK, O. Biocomposites reinforced with natural fibers, **Prog. Polym. Sci**. v. 37, p. 1552-1596, 2012.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: **Chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Walter de Gruyter, 1989. 613 p.

FERRAZ, J. M.; **Produção e Propriedades de Painéis de Fibra de Coco Verde (Cocos nucifera L.) em Mistura com Cimento Portland**.2011. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

FERRO, G. et al. New Concepts for Next Generation of High Performance Concretes. **Procedia Materials Science**. v. 3, p. 1760 – 1766, 2014.

FILHO, J. H., et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**. v.22, n.3, 2017.

FREITAS, M. Preparação e caracterização de materiais compósitos SiC/caulim/Al via “squeeze-casting”. **Cerâmica**. v. 55, p. 271-280, 2009.

GÍRIO, F.M. et al. Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. **Bioresource Technology**. v. 101, n. 13, p. 4775-4800, 2010

FERREIRA, E. J. L. O bambu é um desafio para a conservação e o manejo de florestas no sudoeste da Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 3, p. 46-51, 2014 .

FUJIYAMA, R. T., **Argamassa de Cimento Reforçada por Fibras de Sisal: Caracterização Mecânica e Microestrutural**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

GLEIZE, P. J. et al. Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**. v.29, n. 2, p. 80–87, 2007.

GUIMARÃES JR., M. et al. Preparation of cellulose nanofibrils from bamboo pulp by mechanical defibrillation for their applications in biodegradable composites. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v.15, p.6751-6768, 2015.

GUIMARÃES JÚNIOR, M. et al. Nanofibrilas obtidas de polpas celulósicas de bambu: propriedades e aplicação como reforço em polímeros. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, 2017. 655 p.

GUNASEKARAN, K. et al. Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. **Construction and Building Materials**, v.25, p.92-98, 2011.

GÜNEYISI, E. et al. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 120–130, 2012.

HAMMITT, G.M. II. **Concrete strength relationships**. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1971, Vicksburg.

HASSAN, M.L. et al. Nanofibers from bagasse and rice straw: process optimization and properties. **Wood Science and Technology**. v.46, p.193-205, 2012.

HILLIS, W. E. Wood extractives and their significance to the pulp and paper industries. New York: Academic, 1962. 512p.

HISSEINE, O. A. et al. Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. **Construction and Building Materials**. v. 206, p. 84 – 96, 2019

HOYOS, C. G. et al. Effect of cellulose microcrystalline particles on properties of cement based composites. **Mater Des**. v.51, p. 810–818, 2013.

HUBBEL, C. A.; RAGAUSKAS, A. J. Effect of acid-chlorite delignification on cellulose degree of polymerization. **Bioresource Technology**. v. 101, p. 7410–7415, 2010.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, p. 56 – 58, 1991.

ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2v, 2011.

JARABO, R. Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production: effect on flocculation, retention, drainage and product properties, **Ind. Crops Prod**. v. 39, p. 89-96, 2012.

JHON, V. M. et al. Durability of slag mortar reinforced with coconut fiber. **Cement & Concrete Composites**, v.27, p.565-574, 2005.

JIAO, L. et al. Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement. **PLOS ONE**. v. 11, p. 1 – 13, 2016.

JOAQUIM, A. P. et al. Sisal Organosolv Pulp as Reinforcement for Cement Based Composites. **Materials Research**. v. 12, n. 3, p. 305 – 314, 2009.

JUDZIEWICZ, E.J. et al. **American bamboos**. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press, 1999. 392 p.

KABIR, M. M. et al. Chemical treatments on plant – based natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2883 – 2892, 2012.

KHUSHNOOD, R. A. et al. Modified fracture properties of cement composites with nano/micro carbonized bagasse fibers. **Frattura Ed Integrita Strutturale**. v. 34, p. 534 – 542, 2015.

KLOCK, U. et al. **Química da Madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 3. ed. 2005. 86 p.

KRIKER A. et al. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibers in hot dry climates. **Cement & Concrete Composites**. v. 27, p. 554–648, 2005

KUMODE, M. M. N. et al. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de nanocompósitos de torta de mamona e glicerol reforçados com nanocelulose. In: VII Workshop de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio, 2013. São Carlos, **Anais...** p. 241-243.

LEHNINGER, A. L. et al. **Princípios de bioquímica**. São Paulo: Sarvier, 2002. 722p.

LENGOWSKI, E. C. **Caracterização e predição da cristalinidade de celulose através de espectroscopia no infravermelho e análise multivariada**. 2012. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

LIANG, J. et al. Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites. **Carbon**. v. 47, n. 3, p. 922 – 925, 2009.

LIMA, H. et al. Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement. **Materials and Structures**. v. 41, n. 5, p. 981–989, 2008.

LIMA, P. R. L. et al. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.11, n.6, p.644–651, 2007.

LONDOÑO, X.; PETERSON, P.M. *Guadua sarcocarpa* (Poaceae: Bambuseae), a new species of Amazonian bamboo with fleshy fruits. **Syst. Bot.**, v.16, p. 630-638, 1991.

LOPES, F.F.M; et al. Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n. 7, p. 783-788, 2010.

MACHADO, B. A. S. et al. Obtenção de nanocelulose da fibra de coco verde e incorporação em filmes Biodegradáveis de amido plastificados com glicerol. **Quim. Nova**. v.37, p. 1275-1282, 2014.

MARABEZI, K. **Estudo Sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2009. 142 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MATOS, L. F. S. et al. Resistência e envelhecimento acelerado do concreto contendo resíduos cerâmicos. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 59, 2017. Bento Gonçalves, **Anais...IBRACON**, 2017.

MATSUMOTO, T. et al. Solution properties of cellulose from different biological origins in LiCl/DMAc. **Celulose**. v. 8, n. 4, p. 275-282, 2001.

MAZZETTO, S. E. et al. Fibras de bambu como carga de reforço em materiais compósitos: fonte alternativa, econômica e sustentável. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, 2017. 655 p.

MEDEIROS, E. S. et al. Electrospun nanofibers of poly(vinyl alcohol) reinforced with cellulose nanofibrils. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**. v.2, p. 1-12, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 3a ed., 2008, 674p.

MIRANDA, E. M. et al. Estrutura populacional e o potencial de uso de *Guadua cf. superba* na região do Alto Acre. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, 2017. 655 p.

MOHR, B. J. et al. Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling. **Cement & Concrete Composites**. v. 27, n. 4, p. 435-448, 2005.

MOHR, B. J., Biernacki J, Kurtis K. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber cement-composites. **Cement and Concrete Research**. v. 37, n. 11, p. 1531–1543, 2007.

MOON, R. J. et al. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. **Chem. Soc. Rev.** v. 40, p. 3941 – 3994, 2011.

MORAN-MIRABAL, J.; CRANSTON, E. IB IN DEPTH – Cellulose Nanotechnology: fundamentals and Applications. **Industrial Biotechnology**. v.11, p.14-15, 2015.

MORI, F. A. et al. Estudo da compatibilidade entre a madeira e as cascas de *Eucalyptus grandis* e cimento Portland. **Ciência Florestal**. v.17, n. 3, p. 257-264, 2007.

NASCIMENTO, R. A. A. **Caracterização da lignina de bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor: identificação dos compostos de degradação e reações envolvidas**. 2007. 130 p. Tese (Doutorado em Conversão de Biomassa) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2007.

ONUAGULUCHI, O. et al. Properties of nanofiber reinforced cement composites, **Construction and Building Materials**. v.63, p. 119–124, 2014.

ORTS, W.J. et al. Application of cellulose microfibrils in polymer nanocomposites. **Journal of Polymers and the Environment**. v.13, p.301-306, 2005.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction and Building Materials**. v.25, p.575-581, 2011.

PALMA, M. B. **Influência da agitação e da aeração na atividade de xilanases de *Penicillium janthinellum***. 1993. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

PARVEEN, S.; RANA, S.; FANGUEIRO, R. Macro and nanodimensional plant fiber reinforcements for cementitious composites. **Sustainable and Nonconventional Construction Materials Using Inorganic Bonded Fiber Composites**. p. 343 – 382, 2017.

PASSUELLO A. et al. Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. **Cement & Concrete Composites**. v. 31, p. 699 – 704, 2009.

PATURAU, J. M. **By products of the Cane Sugar Industry**. Amsterdam: Science Publishers, 1989. 366 p.

PEREIRA, C. L. et al. Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber. **Industrial Crops and Products**. v.49, p.88-96. 2013.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo, SP: Globo , 13. ed., 1998.

PFEIL, W. **Concreto Armado**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 4a ed., v.1, 1985, 224p.

PHONG, N.T.; GABR, M.H.; OKUBO, K.; CHUONG, B.; FUJI, T. Enhancement of mechanical properties of carbon fabric/epoxy composites using micro/nano-sized bamboo fibrils. **Material and Design**. v.47, p.624-632, 2013.

PICANÇO, M. S; GHAVAMI, K. Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. **REM - International Engineering Journal**. v. 61, n.1, p. 13 – 18, 2008.

PIMENTA, M. T. B. **Utilização de fluidos no estado sub/supercrítico na polpação de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda***. 2005. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências Físico-Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

QIAN, C. X.; STROEVEN, P. Development of hybrid polypropylene-steel fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 30, p. 63-69, 2000.

RAMIRES, A. R. et al. Thermal conductivity of coconut fiber filled ferrocement sandwich panels. **Construction and Building Materials**. v.37, p.425-431, 2012.

RAMLI, M. et al. Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. **Construction and Building Materials**. v.38, p.554-566, 2013.

REPETTE, W.L Concretos para Fins Especiais e de Última Geração. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.2, p.1807-1842.

RIZWAN, S. A.; BIER, T. A. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. **Construction and Building Materials**. v. 27, n. 1, p. 398 – 403, 2012.

RODRÍGUEZ, N. J. et al. Assessment of coconut fiber insulation characteristics and its use to modulate temperatures in concrete slabs with the aid of a finite element methodology. **Energy and Buildings**. v.43, p.1264-1272, 2011.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Concreto Leve Estrutural. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.2, p.1531-1568.

ROWELL, R. M. et al. **Cell Wall Chemistry**. New York: Taylor & Francis Group, 2005. 487 p.

SAMIR, M. A.S.A.; ALLOIN, F.; DEFRESNE, A. Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. **Biomacromolecules**, v. 6, n.2, p. 612-626, 2005.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**. v. 24, n. 11, p. 2060 – 2071, 2010.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade de carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Quím. Nova**. v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.233-260.

SHAMIM, A. et al. Applications of nano technology in civil engineering. **International Journal of Strategic Engineering**. v. 1, n. 1, p. 48–64, 2018.

SEGAL, L. et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Research Journal**, v.29, n.10, p.786-794, 1959.

SILVA, D. M. et al. Obtenção de derivado de celulose a partir do bagaço de cana de açúcar com potencial aplicação nas indústrias farmacêutica e cosmética. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**. v. 32, n. 1, p. 41-45, 2011.

SILVA, E. J. et al. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v.8, p.1555-1561, 2012.

SILVA, E. J. et al. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.12, p.1268–1273, 2014.

SILVA, V. F. N. **Estudos de Pré-Tratamento e Sacarificação Enzimática de Resíduos Agroindustriais como Etapas no Processo de Obtenção de Etanol Celulósico**. 2009. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola De Engenharia De Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

SILVA, L. et al. A facile approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with improved microstructure and mechanical performance. **Powder Technology**. v. 338, p. 654 – 663, 2018.

SIQUEIRA, G.; BRAS, J.; DUFRESNE, A. Cellulose whiskers versus microfibrils: influence of the nature of the nanoparticle and its surface functionalization on the thermal and mechanical properties of nanocomposites. **Biomacromolecules**. v.10, p.425-432, 2009.

SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibers. **Cement and Concrete Composites** v. 29, pag. 603-608, 2007.

STELTE, W.; SANADI, A.R. Preparation and characterization of cellulose nanofibers from two commercial hardwood and softwood pulps. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. v. 48, p.11211-11219, 2009.

SUN, J. X. et al. Physic-chemical and thermal characterization of cellulose from barley straw. **Polymer Degradation and Stability**, v. 88, n. 3, p. 521-531, 2005.

SYVERUD, K. et al. A comparative study of Eucalyptus and Pinus radiata pulp fibers as raw materials for production of cellulose nanofibrils. **Carbohydrate Polymers**, v. 84, p.1033-1038, 2011.

TANG, X; ALAVI, S. Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. **Carbohydr Polym.** v.85, p. 7–11, 2011.

TEIXEIRA, F. P. et al. Caracterização mecânica de material compósito de matriz cimentícia reforçado com fibras de juta. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21, 2014. Cuiabá. **Anais...** p. 2845-2852.

TERAMOTO, Y. et al. Pretreatment of Eucalyptus Wood Chips for Enzymatic Saccharification Using Combined Sulfuric Acid-Free Ethanol Cooking and Ball Milling. **Biotechnology and Bioengineering.** v. 99, n. 1, p 75 – 85, 2008.

TONOLI, G.H.D. et al. Cellulose micro/nanofibers from Eucalyptus kraft pulp: preparation and properties. **Carbohydrate Polymers.** v.89, p.80-88, 2012.

VAN SOEST, P. J. et al. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science,** Champaign, v. 74, p. 3583- 3597, 1991.

VÁRNAI, A. et al. Restriction of the enzymatic hydrolysis of steam-pretreated spruce by lignin and hemicellulose. **Enzyme and Microbial Technology,** v. 46, n. 3-4, p. 185-193, 2010.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais,** v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

VILLANOVA, J.C.O. et al. Pharmaceutical acrylic beads obtained by suspension polymerization containing cellulose nanowhiskers as excipient for drug delivery. **European Journal of Pharmaceutical Sciences,** v. 42, p.406-415, 2011.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ – Revisão nº00 06/01/2020 produto: cimento portland.** 2021. Disponível em: < <https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2017/11/fispq-cimento-rev-00-2020.pdf>>. Acesso em 20 de Janeiro de 2021.

WAHYUNI, A. S. et al. The performance of concrete with rice husk ash, sea shell ash and bamboo fiber addition. **Procedia Engineering**. v. 95, p. 473-478, 2014.

WYMAN, C. E. et al. Coordinated development of leading biomass pretreatment Technologies. **Bioresource Technology**. v. 96, p. 1959-1966, 2005.

XIE, X. et al. Flexural properties and impact behavior analysis of bamboo cellulosic fibers filled cement based composites. **Construction and Building Materials**. v. 220, p. 403 – 414, 2019

YAO, W.; LI, Z. Flexural behavior of bamboo–fiber-reinforced mortar laminates. **Cement and Concrete Research**. v. 33, p. 15 – 19, 2003

ZHANG, W.P.; CLARK, L.G. Phylogeny and classification of the Bambusoideae (Poaceae). In: JACOBS, S.W.L.; EVERETT, J.E. **Grasses: systematics and evolution**. Collingwood, Victoria, Australia: CSIRO Publishing, 2000. p.35-42.

ZHANG, Y. H. P.; LYND, L. R. Toward a aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulose systems. **Biotechnology and Bioengineering**. v. 88, p. 797-824, 2004.

ZIEGLER, D. et al. Environmentally-friendly dense and porous geopolymers using fly ash and rice husk ash as raw materials. **Materials (Basel)**. v. 9, n. 6, p. 466, 2016.