



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



INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE NANOFIBRAS E
NANOCRISTAIS DE CELULOSE DO BAMBU NATIVO
***Guadua weberbaueri* EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**
PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

TIAGO HENRIQUE DA COSTA VIANA

RIO BRANCO, AC
Junho / 2024

TIAGO HENRIQUE DA COSTA VIANA

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE NANOFIBRAS E
NANOCRISTAIS DE CELULOSE DO BAMBU NATIVO
Guadua weberbaueri EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

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: ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ

Coorientador: JOSÉ ROBERTO DE LIMA MURAD

RIO BRANCO, AC
Junho / 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

- V614i Viana, Tiago Henrique da Costa, 1998 -
Influência da incorporação de nanofibras e nanocristais de celulose do bambu nativo *Guadua weberbaueri* em compósitos cimentícios para construção civil / Tiago Henrique da Costa Viana; orientador: Dr. Anselmo Fortunato Ruiz Rodrigues. – 2024.
103 f.: il.; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia-Cita, Rio Branco, 2024.
Inclui referências bibliográficas.
1. Nanofibras. 2. Nanocristais. 3. Amazônia. I. Rodrigues, Anselmo Fortunato Ruiz (orientador). II. Título.

CDD: 509

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

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE NANOFIBRAS E
NANOCRISTAIS DE CELULOSE DO BAMBU NATIVO
Guadua weberbaueri EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

TIAGO HENRIQUE DA COSTA VIANA

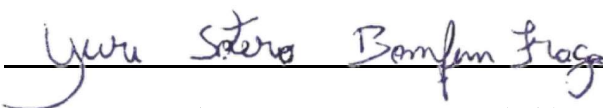
DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 24/06/2024

Documento assinado digitalmente
 ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ
Data: 12/08/2024 15:19:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ
UFAC

Documento assinado digitalmente
 MARCELO RAMON DA SILVA NUNES
Data: 10/08/2024 15:45:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MARCELO RAMON DA SILVA NUNES
IFAC



YURI SOTERO BOMFIM FRAGA
UFAC

A Deus, ao Universo, à Natureza e à
Ciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai e Criador, pelas oportunidades e habilidades, me dadas e desenvolvidas, sem aos quais não chegaria até aqui hoje.

Aos meus pais, Terezinha e João Batista, pelo caminho guiado pela Educação, além de apoio e aconselhamentos em todo o trajeto, mas também a todos da minha família, pela paciência e compreensão neste processo.

À Eliane Sena, Maurício Souza, Maria Rosália Nascimento, amigos dados pelo mestrado e que faltam palavras para expressar as trocas necessárias, as conversas, planejamentos, não apenas de projeto, mas também da vida, inerentes ao progresso neste percurso.

Ao Jhonatha Mendes, Lucas Gomes, Bruna Mendes, Sileide Maia, amigos pessoais que me suportaram nos piores momentos provocados pelo decorrer desta pesquisa e também comemoraram comigo cada passo que dei, por menor que fosse.

À minha terapeuta Talita Montysuma, que foi de fundamental importância para que eu continuasse, sem desistir, nem cometer nenhum ato ao qual me arrependesse posteriormente.

À minha outra terapia, o Street Dance, responsável por canalizar todos os meus piores sentimentos e pensamentos, e transformá-los em arte, movimento e saúde, no bailarino que sou.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia, pela estrutura, apoio e suporte.

Ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil e Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Acre pela estrutura, apoio e suporte, e em especial, a membros do corpo docente Simone Lopes e Yuri Sotero, professores de contribuição ímpar em minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anselmo Fortunato, bem como à BIONORTE e ao laboratório de nanotecnologia, em sua pessoa, pelo auxílio e pelas longas horas nele investido, necessárias ao desenvolvimento de boa parte do aqui exposto.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José Roberto de Lima Murad, pelos aconselhamentos e orientações ao longo da execução do projeto, de forma profissional e pessoal.

À Universidade Federal do Acre e Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio e suporte investido em minha pessoa.

A eu mesmo, que apesar de vivenciar as piores e melhores experiências da minha vida ao longo deste processo, sempre soube manter meu foco, minha organização e meu objetivo, não me deixando abater ou revidar diante das situações, e ainda transformando tudo em combustível para o desenvolvimento do melhor estudo que eu fosse capaz de produzir.

A todos, muito obrigado!

EPÍGRAFE

Seja como o bambu, incline-se diante do vento, mas nunca se quebre.
(Provérbio Chinês).

RESUMO

O advento da nanotecnologia promoveu a influência e crescimento de aplicações em diversas áreas de conhecimento, como na engenharia civil possibilitando, através do uso de nanofibras o reforço de materiais, em compósitos cimentícios. No presente estudo, se objetivou a síntese e a caracterização de nanofibras e nanocristais de celulose, obtidos do bambu nativo *Guadua weberbaueri*, para aplicação em compósitos cimentícios. Os métodos se deram através de revisão sistemática para contextualização das lacunas de pesquisa. Além de síntese e caracterização térmicas e químicas das nanofibras (PBC) e nanocristais (NCC), através de análises Zetasizer, Teor de Celulose, Difração de Raio-X, Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier, Análise Termogravimétrica e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X. Finalmente, aplicação em compósitos cimentícios para ensaios físicos (Absorção de Água, Índice de Vazios, Massa Específica, Variação Dimensional) e mecânicos (Resistência à Compressão Diametral para cálculo de Resistência à Tração) com ruptura aos 28 dias e teor de incorporação de 0,40% em relação à massa de cimento. Os resultados indicaram a falta de estudos nessa linha; as caracterizações apontaram nanopartículas cristalizadas, com estabilidade de massa em relação à alta variação térmica, alto teor de celulose e com presença de silicatos, indicativos positivos à incorporação em compósitos cimentícios; a aplicação mostrou que a adição dos compósitos com PBC e NCC igualaram ou melhoraram os índices físicos, ao passo de que o aumento na resistência à tração foi na ordem de 14,60% e 12,70%, respectivamente. Portanto, é notório que a viabilidade da execução se deu de forma positiva e, ainda é possível observar o avanço técnico na nanotecnologia aplicada à construção civil, com uso de materiais nativos abundantes.

Palavras-chave: Nanofibras e nanocristais. Caracterização. *Guadua weberbaueri*. Resistência à tração. Amazônia.

ABSTRACT

The advent of nanotechnology has promoted the influence and growth of applications in several areas of knowledge, such as civil engineering, enabling, through the use of nanofibers, the reinforcement of materials in cementitious composites. The objective of this study was to synthesize and characterize cellulose nanofibers and nanocrystals obtained from the native bamboo *Guadua weberbaueri* for application in cementitious composites. The methods were carried out through a systematic review to contextualize the research gaps. In addition to thermal and chemical synthesis and characterization of nanofibers (PBC) and nanocrystals (NCC), through Zetasizer analysis, Cellulose Content, X-Ray Diffraction, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Thermogravimetric Analysis and X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy. Finally, application in cementitious composites for physical (Water Absorption, Void Index, Specific Mass, Dimensional Variation) and mechanical (Diametrical Compressive Strength for Tensile Strength calculation) tests with rupture at 28 days and incorporation content of 0.40% in relation to the cement mass. The results indicated the lack of studies in this line; The characterizations pointed to crystallized nanoparticles, with mass stability in relation to high thermal variation, high cellulose content and with the presence of silicates, positive indications for incorporation into cementitious composites; the application showed that the addition of composites with PBC and NCC equaled or improved the physical indexes, while the increase in tensile strength was in the order of 14.60% and 12.70%, respectively. Therefore, it is notorious that the feasibility of the execution was positive and it is still possible to observe the technical advance in nanotechnology applied to civil construction, with the use of abundant native materials.

Keywords: Nanofibers and nanocrystals. Characterization. *Guadua weberbaueri*. Tensile strength. Amazon.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 – Estudos obtidos, por áreas de concentração. 35

Figura 2 – Estudos obtidos, por ano de publicação ou vinculação em base de dados.... 36

CAPÍTULO II

Figura 1 – Coordenadas geográficas do local de coleta das varas de bambu *Guadua weberbaueri*. 46

Figura 2 – Exsicata para identificação de espécie, contendo folha e caule do bambu *Guadua weberbaueri*. 47

Figura 3 – (a) Bambu cortado para moagem; (b) bambu moído. 48

Figura 4 – Amostras PDC (coloração marrom clara); PBC (coloração branca) e NCC (coloração marrom escuro). 50

Figura 5 – Síntese de etapas executadas no decorrer do estudo. 53

Figura 6 – Distribuição de tamanhos de partículas por intensidade da amostra NCC-C 54

Figura 7 – Distribuição de tamanhos de partículas por volume da amostra NCC-C..... 54

Figura 8 – Distribuição de tamanhos de partículas por intensidade da amostra NCC-L.55

Figura 9 – Distribuição de tamanhos de partículas por volume da amostra NCC-L..... 55

Figura 10 – Distribuição de tamanhos de partículas por intensidade da amostra NCC-S.
..... 56

Figura 11 – Distribuição de tamanhos de partículas por volume da amostra NCC-S.... 57

Figura 12 – Difratoograma de raios-x das amostras..... 58

Figura 13 – Teores de matéria seca e umidade média presentes nas amostras. 59

Figura 14 – Teores médios de fibras FDN e FDA presentes nas amostras. 60

Figura 15 – Teores de celulose, lignina e hemicelulose presentes nas amostras..... 61

Figura 16 – Espectro de FTIR para as amostras no espectro de 400 a 4000 cm^{-1} 62

Figura 17 – Análise de variação térmica diferencial das amostras..... 63

Figura 18 – Análise de variação termogravimétrica das amostras. 64

Figura 19 – Análise de interpolação entre variação térmica diferencial e termogravimétrica das amostras NCC e PBC..... 65

CAPÍTULO III

Figura 1: Curva granulométrica da areia do Rio Acre utilizada..... 80

Figura 2: (A) preparo de CP de amostras controle (C); (B) preparo de CP com amostra BT 80

Figura 3: (A) preparo de CP com amostra PBC; (B) preparo de CP com amostra PDC.	81
Figura 4: Preparo de CP com amostra NCC.....	81
Figura 5: (A) CP em cura inicial; (B) CPs imersos em tanque.....	82
Figura 6: (A) CPs em processo de secagem em estufa; (B) CPs imersos em água a nível	83
Figura 7: Balança hidrostática para realização de medição de massa imersa.	83
Figura 8: (A) Prensa para ruptura de CPs, a compressão diametral, adaptada com suporte de apoio; (B) CPs rompidos, à esquerda, amostra controle, à direita, CP com amostra NCC (destaque).....	85
Figura 9: Gráfico de absorção de água, após análise estatística.....	88
Figura 10: Gráfico de índice de vazios, após análise estatística.....	89
Figura 11: Gráfico de massa específica, após análise estatística.....	90
Figura 12: Gráfico de variação dimensional de comprimento e diâmetro, após análise estatística.	91
Figura 13: Dispersão de valores obtidos em ensaio de resistência a compressão diametral, para obtenção da tração, correlacionando amostra aditivada, CP e resistência obtida.	92
Figura 14: Gráfico de resistência a tração, após análise estatística.	93

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 – Descritores utilizados em cada base de dados indexadas.	30
Tabela 2 – Catalogação de estudos obtidos a partir dos descritores e bases de dados. ...	31
Tabela 3 – Relação entre áreas de concentração e identificação das mesmas.	34

CAPÍTULO II

Tabela 1 – Intensidade percentual de compostos encontrados na análise para a amostra PBC.	65
--	----

CAPÍTULO III

Tabela 1: Processo de síntese das amostras.	78
Tabela 2: Proporção de insumos utilizados.	79
Tabela 3: Composição do Cimento Portland utilizado.	79
Tabela 4: Dados obtidos de medições após análise estatística.	87
Tabela 5: Comparativo entre as alterações promovidas pela adição de nanofibras e nanocristais de celulose, em relação à amostra controle.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

kgf/cm ²	Quilograma-força por centímetro quadrado
E01	Estudos, enumerados a partir do 1
A01	Áreas de concentração, enumeradas a partir da 1
NCC	Nanocristais de celulose
°C	Graus Celsius
UFAC	Universidade Federal do Acre
UFACPZ	Identificação de tombamento conforme o Parque Zoobotânico da UFAC
cm	Centímetros
h	Hora
BT	Bambu triturado
g	Gramas
mL	Mililitros
%	Porcentagem
NaOH	Hidróxido de sódio
μm	Micrômetro
PDC	Polpa deslignificada de celulose
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
PBC	Polpa branqueada de celulose
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
DRX	Difração de Raios-X
FDN/FDA	Fibras solúveis em detergente ácido e detergente neutro
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
TGA	Análise termogravimétrica
DTG	Diferencial térmico
EDX	Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X
nm	Nanômetro
2θ	Ângulo de difração
MS	Matéria seca
UMID	Umidade
HEMIC	Hemicelulose
CELUL	Celulose
LIGN	Lignina

O	Oxigênio
C	Carbono
H	Hidrogênio
Rh	Ródio
V	Vanádio
Cu	Cobre
Na	Sódio
Si	Silício
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Kg	Quilograma
CP	Corpo de prova
C	Controle
s	Segundo
VDs,com	Variação dimensional de comprimento seco
VDs,dia	Variação dimensional de diâmetro seco
Mi	Massa imersa
Msat	Massa saturada
VDsat,com	Variação dimensional de comprimento saturado
VDsat,dia	Variação dimensional de diâmetro saturado
A	Absorção de água
I_v	Índice de vazios
ρ	Massa específica
VD	Variação dimensional
$f_{ct,sp}$	resistência a tração por compressão diametral
N	Universo amostral
ANOVA	Análise de Variâncias

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 Bambu como elemento construtivo	21
2.2 Nanotecnologia na construção civil	22
2.3 Nanofibras vegetais	24
CAPÍTULO I	26
Aplicações da fibra de <i>Guadua weberbaeuri</i> : uma revisão sistemática sob a ótica da construção civil, entre os anos de 2017 a 2022	27
RESUMO	27
ABSTRACT	27
1 INTRODUÇÃO	28
2 DESENVOLVIMENTO	29
2.1 Descritores e bases de dados	29
2.2 Catalogação de dados	30
2.3 Análise gráfica	34
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	37
Como citar este artigo	41
CAPÍTULO II	42
PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOFIBRAS E NANOCRISTAIS DE CELULOSE DE <i>Guadua weberbaueri</i>	43
RESUMO	43
ABSTRACT	43
1 INTRODUÇÃO	44
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 Etapas preliminares	45
2.2 Produção de amostras e tratamentos químicos	48
2.3 Análises	50
2.3.1 Distribuição de diâmetros de partículas	50
2.3.2 Cristalização de amostras	51
2.3.3 Teor de fibras e celulose	51

2.3.4 Caracterização de ligações de compostos	51
2.3.5 Caracterizações térmicas.....	52
2.3.6 Caracterização de elementos e compostos constituintes.....	52
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
3.1 Resultados.....	53
3.1.1 Distribuição de diâmetros de partículas	53
3.1.2 Difração de raios-X.....	57
3.1.3 Teor de fibras e celulose	58
3.1.4 Caracterização de ligações de compostos	61
3.1.5 Caracterizações térmicas.....	62
3.1.6 Caracterização de elementos e compostos constituintes.....	65
3.2 Discussões.....	66
4 CONCLUSÕES	69
AGRADECIMENTOS	69
REFERÊNCIAS	69
CAPÍTULO III	74
1 INTRODUÇÃO.....	76
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	78
2.1 Síntese de nanofibras e nanocristais	78
2.2 Preparo de argamassa	78
2.3 Ensaio físicos	82
2.4 Ensaio mecânicos	84
2.5 Análise estatística	85
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
3.1 Resultados.....	86
3.1.1 Propriedades físicas	86
3.1.2 Absorção de água.....	88
3.1.3 Índice de vazios.....	88
3.1.4 Massa específica	89
3.1.5 Variação Dimensional.....	90
3.1.6 Propriedades mecânicas	91
3.1.7 Resistência a tração	92
3.2 Discussões.....	94
3.2.1 Absorção de água	94

3.2.2 Índice de vazios.....	95
3.2.3 Massa específica	95
3.2.4 Variação dimensional.....	95
3.2.5 Resistência a tração.....	96
4 CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS	97
3 CONCLUSÕES GERAIS	100
4 RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1 INTRODUÇÃO GERAL

O consumo de recursos naturais, bem como a pegada de carbono emitida nas fabricações de materiais e execução de processos, na construção civil, a caracterizam como um setor responsável por grande parte das emissões e poluentes, sejam eles de potencial hídrico, aéreo, sonoro, dentre outros (Morais, 2023). Essa problemática aponta para a necessidade de aplicação de materiais com menor potencial no impacto ambiental, além de também propiciarem a otimização dos existentes, para sua posterior diminuição de consumo e, conseqüentemente, danos oriundos do processo de beneficiamento.

Como uma medida solucionadora de tais questionamentos, surge a perspectiva da aplicação da nanotecnologia na construção civil. Através de processos de obtenção de nanomateriais, de origem vegetal, é possível otimizar materiais tradicionais de maior difusão e uso, verificando sua menor utilização. Em relação a fonte de obtenção do material vegetal, torna-se interesse a exploração de substratos abundantes, como materiais nativos, na ótica em questão, o bambu amazônico *Guadua weberbaueri*. Logo, a incorporação de nanofibras e nanocristais de celulose, obtidos do bambu nativo, no compósito cimentício, a base de Cimento Portland, verifica-se possível quanto a alternativa de pesquisa e desenvolvimento (Morais, 2021).

Para este desenvolvimento, a pesquisa se limita a explorar os aspectos de avaliação da resistência mecânica à tração e propriedades físicas, perpassando, inicialmente, pelas etapas de caracterização química e térmica, das sínteses de nanofibras e nanocristais realizadas. Tendo, portanto, exclusão na verificação de demais propriedades e caracterizações que fogem ao escopo supracitado.

Nesse sentido, a utilização do bambu enquanto material construtivo é desenvolvida desde as moradias vernaculares, por sua abundância e facilidade de tratamento, proporcionando estruturas simples e com considerável resistência estrutural em contrapartida ao baixo peso específico, próprias para edificações rupestres (Hora; Barbosa, 2023). Considerando também a expressividade da mancha verde de distribuição das espécies de bambu, pelo mundo, ao longo da linha Equatorial, e em escala local, representando cerca de 62% das espécies de paisagens do Acre, a abundância da “taboca” (nome popularmente dado aos espécimes do gênero *Guadua*) é outro fator considerável de trabalho (Bayma *et al.*, 2023).

Aliado ao desenvolvimento tecnológico provocado e expressivo ao longo dos últimos anos, se dá o advento da nanotecnologia e desenvolvimento de materiais otimizados a partir da aplicação da escala nanométrica, responsável por contornar cenários e interligar disciplinas, promovendo crescimentos transversais em diferentes áreas de conhecimento (Arruda; Ferreira, 2023).

Corroborando a utilização da nanotecnologia, com a abundância do bambu no Acre, bem como sua versatilidade de uso, histórico e técnico, na construção civil, se debruça o presente estudo. O desenvolvimento e aplicação de compósitos cimentícios, oriundos da incorporação de nanofibras e nanocristais de celulose obtidos do bambu *Guadua weberbaueri*, nativo amazônico, dá vistas ao estudo, entrelaçando conceitos de tecnologia, sustentabilidade e inovação, aplicadas ao desenvolvimento de nanomateriais locais.

Estruturalmente, o corpo da presente dissertação é organizado ao longo de três capítulos e demonstra os resultados obtidos ao longo do processo de pesquisa: verificação de estado da arte, obtenção do material e aplicação. No capítulo I, um artigo de revisão mostra as atualidades do cenário de fibras vegetais da espécie aqui utilizada, na construção civil. O capítulo II expõe os processos de síntese e caracterização das nanofibras e nanocristais de celulose. Finalmente, o capítulo III demonstra a aplicação dos nanomateriais em compósitos cimentícios e seus desdobramentos mecânicos e físicos. Os capítulos componentes da dissertação podem conter alterações propostas pela banca avaliadora, em relação aos correspondentes artigos publicados.

Portanto, é notório que o arcabouço supracitado converge ao que objetiva o presente estudo: sintetizar, caracterizar e incorporar nanofibras e nanocristais de celulose, obtidos do bambu nativo amazônico *Guadua weberbaueri*, em compósitos cimentícios, com vistas à otimização do desempenho em resistência mecânica e propriedades físicas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Bambu como elemento construtivo

A abundância do bambu se dá através de 123 gêneros e 1.642 espécies de bambus, dos quais, cerca de 1.521 são lenhosos (Amaral *et al.*, 2021). As características dessa gramínea se classificam como angiospermas monocotiledôneas, as quais pertencem a família *Poacea*, com classificação de família *Bambusoidae*; as famílias se subdividem ao longo de três grandes tribos que, enquanto agrupamentos, abrigam tipificações de números variados de gêneros (Amaral *et al.*, 2021). Enquanto Brasil, o gênero *Guadua* se distingue por predominar, com cerca de 19 espécies nativas, das quais cinco são endêmicas distribuídas pelo país, ao passo que a Amazônia abriga sua maior concentração (Amaral *et al.*, 2021).

Para potencializar a utilização do gênero *Guadua*, com abundância na Amazônia, já é buscado explorar seu desempenho quanto a resistência mecânica, ao longo de suas diferentes espécies que o compõe (Rodriguez-Sotelo *et al.*, 2023). *Guadua lynnclarkiae*, *Guadua weberbaueri* e *Guadua superba*, quando caracterizados em termos de resistência mecânica e propriedades físicas, relacionadas às potencialidades de uso para construção civil, indicaram que *G. weberbaueri* e *G. lynnclarkiae*, têm caracterizações adequadas para construção civil, ao passo que a destinação mais indicada para *G. superba*, seria enquanto material construtivo em edificações rurais e de menor exigência estrutural (Rodriguez-Sotelo *et al.*, 2023).

Em uma outra perspectiva, porém ainda permeando o gênero *Guadua*, está a vertente dos projetos estruturais com aplicação de espécies endêmicas (Giuseppina Vanga *et al.*, 2021). *Guadua angustifolia* Kunth foi a espécie adotada para a concepção de projetos estruturais do tipo indicado para habitações de interesse social; seu desempenho permitiu verificar que, seguindo pressupostos de bioconstrução, os parâmetros orçamentários permitiram construções de baixo custo, aliado à versatilidade do bambu, resultando em construções com viabilidade executiva de desenvolvimento, próprio a suprir questões habitacionais e ambientais (Giuseppina Vanga *et al.*, 2021).

É importante salientar a existência da capacidade estruturante e resistiva do bambu, não exclusiva às espécies do gênero *Guadua*, uma vez que a sua capacidade portante é própria do seu arranjo de fibras interna constituintes, resultando em

espécimes com elevados diâmetro e altura de colmos, variando devido as peculiaridades de cada gênero e localidade de crescimento (Amaral *et al.*, 2021). Demais espécies que ocorrem ao longo do trópico equatorial, como *Bambusa balcooa*, tiveram suas potencialidades verificadas quanto à capacidade para execução de estruturas de grande porte, como pontes, o que resultou na indicação de que seu uso inteiro, enquanto colmo, possui a resistência mecânica suficiente, desde que sejam dadas atenção às suas peculiaridades inerentes, como o tratamento químico adequado para sua preservação (Ross; Alexander, 2022).

A utilização do bambu, como material construtivo, insere uma importante composição no que tange aos materiais alternativos, tendo essa denominação por se relacionarem como opções aos materiais tradicionalmente utilizados, com uma maior pegada de carbono (liberação de carbono ao longo das etapas da cadeia produtiva) (Hernández-Zamora; Jiménez-Martinez; Sánchez-Monge, 2021). Adobe, cânhamo, palha, tijolos ecológicos, dentre outros, são elementos que compõem o cenário ao qual o bambu se enquadra, denotando também, que como características destes materiais, são o baixo custo, a versatilidade de utilização, além de a baixa pegada de carbono em sua composição e no seu desprendimento de uso (Hernández-Zamora; Jiménez-Martinez; Sánchez-Monge, 2021).

2.2 Nanotecnologia na construção civil

A nanotecnologia, difundida como a ciência que trabalha na escala do fator n (nano), onde o metro é dividido a sua 10^9 potência, esclarece que as propriedades dos materiais têm diferentes comportamentos, tais quais suas escalas de desempenho, mudam (Durán *et al.*, 2023). A exemplo, a prata, que possui propriedades em um mundo macro, comum à maior parte dos metais, porém no mundo nano, a relação entre seus elétrons e sua maior superfície específica, em razão ao tamanho de nanopartículas, gera as propriedades de um material com características antimicrobianas, denunciando a nanopartícula de prata enquanto exímio produto de forma isolada, ou ainda, combinada a outros elementos, como o cobre, que o potencializa (Durán *et al.*, 2023). Tal paralelo, demonstra que a nanotecnologia consegue estabelecer parâmetros próprios, em seu campo de trabalho, aplicado a diversos outros, no caso em questão, à construção civil, conforme visto a seguir.

Um dos exponenciais da correlação entre nanotecnologia e construção civil é o nanografeno, por unir características de leveza, resistência e baixo custo, esse potencial tem sido explorado de forma cada vez mais evidente (Pereira Júnior *et al.*, 2021). O nanografeno, enquanto aditivo para tintas, do tipo epóxi, tem buscado estabelecer que as ligações químicas entre seus constituintes majorem a resistência à compressão e vida útil das estruturas metálicas, através de reações anticorrosivas, em peças e ligações, revestindo os componentes, de modo a isolar e prevenir reações de oxidação metálica (Pereira Júnior *et al.*, 2021).

De maneira similar, o estudo estrutural compõe uma grande vertente do uso do nanografeno, também quando incorporado a materiais argamassados, dito compósitos estruturais (Ruivo, 2024). Baixas proporções do nanografeno, em forma de óxido de grafeno, combinadas ao cimento Portland, convencional, têm alterado, em tom de melhoria, aspectos de microestrutura e hidratação de argamassas, resultando a otimização da trabalhabilidade (em compósitos com aditivação do tipo superplastificação policarboxilata), enquanto aspecto físico, mas principalmente, no tratamento das propriedades de resistência à tração e à compressão (Ruivo, 2024).

Paralelo ao grafeno, existem outras tendências no desenvolvimento dos estudos de nanotecnologia construtiva, pautadas em materiais que buscam, de maneira basal, explorar propriedades em escalas nano, a partir de sistemas existentes (Pereira; Leal; Ferreira, 2021). A nanossílica tem surgido nesse meio como solução à carbonatação por, em condições de baixa concentração de hidróxido de sódio, o diâmetro dos poros da nanopartícula agir no impedimento do efeito físico pelo ataque de CO₂, visto que essa manifestação tende a diminuir a vida útil dos elementos de base cimentícia, e tem mostrado que, mesmo com pequena quantidade, de cerca de 1%, para traços de dosagem, os efeitos têm sido positivos, tanto para a durabilidade (diminuição da carbonatação), mas também na melhoria da resistência mecânica (Pereira; Leal; Ferreira, 2021).

A linha dos materiais compósitos, resultados da nova era de produção científica da nanotecnologia construtiva, tem aberto cada vez mais, os exponencias de uso para nanocomponentes (Lopes *et al.*, 2022). Concretos reforçados com fibra de aço e nanotubos de carbono têm permitido verificar a execução da melhoria das partículas cimentícias ao nível nano, possibilitando nesta escala, o reforço estrutural com os nanotubos de carbono, em simultaneidade, as fibras de aço permitem a diminuição da

fissuração, tendo como resultado, a otimização do desempenho mecânico e o aumento da durabilidade (Lopes *et al.*, 2022).

A interdisciplinaridade da nanotecnologia promove efeitos correlatos a diversas áreas, de forma mais próxima, biologia, química e física, como áreas puras, mas também para áreas aplicadas, como medicina, engenharia, dentre outros (Santos; Bispo; Tedeschi, 2021). Portanto, para a engenharia civil, particularmente, os efeitos positivos têm proporcionado a otimização do desenvolvimento de estruturas, bem como na durabilidade das edificações; de maneira geral, muito já se tem desenvolvido, ao passo de que novas perspectivas também estão e estar-se-ão em desenvolvimento no futuro (Santos; Bispo; Tedeschi, 2021).

2.3 Nanofibras vegetais

Fibras naturais, derivando compósitos, possuem um amplo campo de aplicação, compreendido desde artefatos ornamentais, até componentes estruturais de aviões, como materiais estruturantes, no entanto, compósitos poliméricos possibilitam destinar a otimização da fibra para implemento de propriedades físicas e mecânicas (Marin *et al.*, 2023). A compatibilização de compósitos é produto direto da relação entre a afinidade química da fibra, com a compatibilidade da superfície da matriz, resultando em proporções que podem variar, conforme teor de adição, em níveis de compatibilidade ou incompatibilidade (Marin *et al.*, 2023).

Diferentes composições, que variam entre incorporação de fibras de diferentes origens, também são exploradas, como as que integram fibras de origem natural e sintética (Chahinez *et al.*, 2023). Concretos autoadensáveis submetidos a flexão, oriundos da mistura de teores de fibras vegetais e de propileno, indicaram resultados de melhoria de até 13% na resistência a flexão, com diminuição de índice de fluência do concreto (deformação ao longo do tempo) em até 16% (Chahinez *et al.*, 2023).

As fibras vegetais vêm, de forma crescente, consolidando exponenciais de aplicação para a construção civil, variando entre si, espécies, teores e composições na produção (Boubaaya *et al.*, 2023). Fibras da folha de palmeiras, através de bio-compósitos de cimento e areia, atestaram comportamentos positivos na resistência à compressão e absorção, quando aplicados com fibras de diâmetros entre 3 mm a 7 mm, nas propriedades dos materiais (Boubaaya *et al.*, 2023)

De maneira similar, fibras de folhas de buriti foram experienciadas para a composição de compósitos com aplicação de matriz do tipo resina (Pereira *et al.*, 2021). A partir de uma combinação de resinas poliéster e epóxi, a incorporação das fibras demonstrou que os resultados mecânicos de resistência à tração, combinados com o desempenho físico relacionado ao peso específico, possibilitou verificar que compósitos alternativos com folha de buriti, integravam produtos leves ao mesmo tempo que resistentes (Pereira *et al.*, 2021).

Outro indicativo para exponenciação das aplicações das fibras, se relaciona com a sazonalidade e distribuição temporal na abundância do vegetal ao qual a fibra será obtida (Cruz-Velasco; Chamorro-Mejia; Cordoba-Cely, 2021). *Furcraea macrophylla*, *Stromanthe jacquinii*, *Schoenoplectus californicus* e *Carludovica palmata*, espécies endêmicas do Sul da Colômbia, foram exploradas para caracterização físico-química de suas fibras, resultando então, que a alta rigidez das espécies, era fator positivo principal, ao passo de que, enquanto desafio, seria controlar seu alto índice de umidade presente, fator chave para a deliberação em sua utilização (Cruz-Velasco; Chamorro-Mejia; Cordoba-Cely, 2021).

Paralelo ao sentido ecológico do uso de fibras, enquanto fator de sustentabilidade por se tratar de material vegetal nativo e abundante, também se alinham as utilizações de fibras de origem reciclada, como as fibras kraft (Alves; Pereira; Figueiredo, 2023). A partir da utilização da matriz cimentícia, intercaladas em diferentes teores de adição, as fibras kraft, obtidas do processo de reciclagem de embalagens de cimento descartadas, indicaram resultados de compatibilidade entre fibra e matriz, ao passo que a hidratação do processo de cura teve melhoria do tipo de baixa inibição, bem como a não ocorrência do processo de mineralização das fibras, sinalizou fortemente essa integração efetiva entre os componentes (Alves; Pereira; Figueiredo, 2023).

CAPÍTULO I

**Aplicações da fibra de *Guadua weberbaueri*: uma revisão sistemática
sob a ótica da construção civil, entre os anos de 2017 a 2022**

REVISTA: CIÊNCIA FLORESTAL (ISSN 1980-5098)

CLASSIFICAÇÃO QUALIS/CAPES (2017-2020): B2

<https://doi.org/10.5902/1980509872310>

Aplicações da fibra de *Guadua weberbaueri*: uma revisão sistemática sob a ótica da construção civil, entre os anos de 2017 a 2022

Applications of *Guadua weberbaueri* fiber: a systematic review from the perspective of civil construction, between the years 2017 to 2022

RESUMO

A exploração das potencialidades das espécies Amazônicas, como o *Guadua weberbaueri* popularmente conhecido como bambu, é verificada em diversos segmentos. Tendo seu grande potencial na aplicação para a construção civil e nanotecnologia. Este estudo tem como objetivo verificar as pesquisas de aplicações da fibra de bambu *Guadua weberbaueri*, para a construção civil, entre 2017 e 2022. Através de quatro bases de dados indexadas de estudos (Google Acadêmico, SciELO, PubMed e BVS), aplicando para seis descritores, e os catalogando, ao longo de suas áreas de exploração e ano de vinculação, foi possível analisar os dados e resultados obtidos. Esses resultados apontaram para 10 estudos que utilizaram a espécie, sendo que esses estudos foram, majoritariamente, na área de caracterização das propriedades biológicas ou físico-químicas e nenhum corresponde à área de construção civil. Também percebeu-se que ao longo dos últimos cinco anos, a curva de estudos realizados é crescente. Assim, verificou-se a carência na exploração do potencial, tanto da espécie *Guadua weberbaueri*, como da sua fibra, como componente estrutural, dentro da engenharia civil.

Palavras-chave: Amazônia; Estruturas; Bambu; Engenharia Civil

ABSTRACT

The exploration of the potential of Amazonian species, such as *Guadua weberbaueri*, popularly known as bamboo, is verified in several segments. Having its great potential in the application for civil construction and nanotechnology. This study aims to verify the research on applications of *Guadua weberbaueri* bamboo fiber, for civil construction, between 2017 and 2022. Through four indexed databases of studies (Google Scholar, SciELO, PubMed and BVS), applying to six descriptors, and cataloguing them, along their areas of exploration and year of linkage, it was possible to analyze the data and results obtained. These results pointed to 10 studies that used the species, and these studies were mostly in the area of characterization of biological or physicochemical properties and none corresponds to the area of civil construction. It was also noticed that over the last five years, the curve of studies carried out is increasing. Thus, it was verified the lack in the exploration of the potential, both of the species *Guadua weberbaueri*, and of its fiber, as a structural component, within civil engineering.

Keywords: Amazônia; Structures; Bamboo; Civil Engineering

1 INTRODUÇÃO

As espécies vegetais da Amazônia possuem diversidades de propriedades, muitas vezes únicas, que abrangem enorme versatilidade de aplicações (Reis *et al.*, 2019). A exemplo, espécies madeireiras como copaíba (*Copaifera duckei* Dwyer) e samaúma (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn) contemplam aspectos mecânicos e físicos, como módulo de ruptura e resistência ao cisalhamento de, respectivamente, 0,069738 e 0,030096 kgf/cm²; e 1,438139 e 1,107651 kgf/cm², típicos de madeiras tropicais comercializadas, notando inclusive, relações similares de colheitas entre ambas, com aspecto de potencial econômico (Reis *et al.*, 2019).

Assim, essas espécies geram possibilidades de utilização desde sua forma natural, até em composições com materiais mistos, como em compósitos, que são produtos que agem com composição de resistência mecânica otimizada adicionados a partir da junção de materiais de diferentes origens, mas que combinados, tem um maior potencial característico de resistência mecânica (Castro *et al.*, 2019). Com isso, surgem compósitos de madeira amazônica e cimento, aditivados com cal hidratada, que demonstraram potencial técnico para fabricação e utilização, na aplicação em construção civil (Castro *et al.*, 2019). Usos como esse demonstram a importância do estudo dos compósitos com espécies nativas amazônicas.

Refinando a análise, com atenção aos compósitos mistos, destacam-se uma série de potenciais, que refletem uma gama de utilização. Desde a utilização do resíduo de bambu para confecção de carvão ativado, até a elaboração de painéis cimento-madeira, enriquecidos pela casca do arroz, ou através do tijolo de solo-cimento com adição do bagaço da cana-de-açúcar, revelam fragmentos do panorama de soluções que vem sendo tecidas ao longo dos últimos anos (Santana *et al.*, 2019; Moura *et al.*, 2020; Lilge; Haselein; Santini, 2021). Essencialmente, uma utilização particular, de compósitos de fibra da folha do abacaxi, com usos diversos, estende o conceito dos compósitos, ao nível de incorporação de fibras vegetais, um importante elemento construtivo (Negrão; Pinto; Silva, 2020).

Nota-se, que dentre as espécies, o bambu se destaca como vertente maior para amplitude na gama de utilizações, pela sua natureza particular de suas propriedades físicas e mecânicas (Santana *et al.*, 2019; Brand *et al.*, 2020). Bambus dos gêneros *Bambusa* e *Phyllostachys* encabeçam inúmeros estudos que

exploram suas potencialidades nos segmentos mais amplos possíveis, destacando essencialmente, a construção civil e suas subáreas (Santana *et al.*, 2019; Brand *et al.*, 2020).

Assim, a aplicação das fibras de bambu surge como importante alternativa dentro da construção civil (Moraes *et al.*, 2018). Painéis conglomerados a partir da adição de fibras de *Bambusa tuldoidea* apresentaram resultados mecânicos de melhoria na resistência, tanto para tração, como flexão, demonstrando estratégias potenciais de aplicação como alternativa a reforço estrutural, ou ainda como alternativa de acabamento para revestimentos (Moraes *et al.*, 2018).

Essencialmente ao estudo proposto, as microfibras incorporadas em argamassas demonstram um potencial particular. Constituindo-se dos pressupostos mencionados anteriormente, representam uma perspectiva crescente de exploração, sendo a adição das fibras de celulose como compósito uma aplicação com potencial de utilização extremamente vantajosa, tendo em vista que um elemento de incorporação como as fibras, propicia o endurecimento dos materiais, aumentando sua resistência mecânica (Pescarolo *et al.*, 2021).

A partir da síntese de aspectos técnicos, ambientais, tecnológicos e sustentáveis acima descritos, justifica-se o presente estudo. Uma vez que o bambu nativo da Amazônia, da espécie *Guadua weberbaueri*, pode demonstrar aplicações nos mais variados campos, no entanto, sua versatilidade para a construção civil carece de maiores apontamentos em estudos, tendo em vista que possui potencial intrínseco de resistência físico-mecânica, para utilização nas principais vertentes do segmento construtivo, como o estrutural.

Portanto, constitui-se como objetivo deste estudo verificar as aplicações da fibra de *Guadua weberbaueri*, para a construção civil, nos anos entre 2017 e 2022. Além disso, o estudo buscou identificar áreas de concentração de estudos e relacionar estudos de bases indexadas ao longo do período referido.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descritores e bases de dados

Foram adotados seis descritores abaixo descritos, por ordem de abrangência do assunto, conforme maior abrangência, para menor, em relação à temática

analisada. Em relação às bases de dados indexadas, foram utilizadas as quatro bases principais para revisão mostrado na Tabela 1. A Tabela 1 correlaciona os descritores utilizados, as bases, e os resultados de cada pesquisa realizada, para os estudos obtidos, no período dos últimos cinco anos, compreendidos entre 2017 a 2022, com data de atualização de resultados em outubro de 2023. A pesquisa realizada utilizou termos em inglês para aumento de abrangência dos resultados.

Tabela 1 – Descritores utilizados em cada base de dados indexadas.

Descritor	Base de dados				
	SciELO	G. Acadêmico	PubMed	BVS	Total
Bamboo	148	171.000	2.832	2.660	176.640
Bamboo fibers	14	17;600	321	160	495
<i>Guadua</i>	53	13.600	22	25	13.700
<i>Guadua</i> fibers	5	1.770	5	4	1.784
<i>Guadua weberbaueri</i>	0	295	1	1	297
<i>Guadua weberbaueri</i> fibers	0	35	0	0	35

Fonte: Organização dos autores.

Legenda: Correspondências encontradas a partir da busca dos descritores relacionados.

Conforme a Tabela 1, nota-se que quando a abrangência do descritor se torna menor, menos estudos realizados são obtidos. Do descritor total “Bamboo” obteve-se 176.640 estudos, em contrapartida ao descritor mais específico para a pesquisa em questão “*Guadua weberbaueri* fibers”, com apenas 35 estudos. Sendo, alguns dos 35 encontrados, 32 diferentes entre si, uma vez que alguns estudos se encontravam indexados em mais de uma base de dados. Verifica-se ainda, que para o descritor mais abrangente, são encontrados resultados em todas as bases, ao passo que ao descritor mais específico, somente uma base correspondeu à pesquisa. Para os estudos, foram excluídos aqueles que não contemplavam como objeto principal, a espécie *Guadua weberbaueri*, assim como foram excluídos estudos fora do intervalo cronológico em questão, entre 2017 e 2022. Em relação aos estudos sobre engenharia civil, foram excluídos aqueles que se apresentavam fora da área de escopo do estudo.

2.2 Catalogação de dados

De posse da pesquisa nas bases anteriores, para o presente estudo, foram correlacionados os estudos obtidos pelo descritor mais específico “*Guadua*

weberbaueri fibers”. A catalogação dos estudos resultou na Tabela 2 que relaciona os estudos encontrados, com sua respectiva área de concentração de análise, bem como autores, e segundo um indicativo de identificação para orientar a presente análise executada.

Tabela 2 – Catalogação de estudos obtidos a partir dos descritores e bases de dados.

Identi- ficação	Estudos	Área de concentração	Autor(es)
E01	Evaluation of fiber quality from native amazonian bamboos <i>Guadua weberbaueri</i> and <i>Guadua aff. Lynneclarkiae</i> for pulp and paper production	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Pinheiro et al. (2022)****
E02	Anatomical characterization of the roots, leaves and culms of <i>Guadua weberbaueri</i> in different growing environments	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Rodrigues et al. (2020)
E03	Allometric derivation and estimation of <i>Guadua weberbaueri</i> and <i>G. sarcocarpa</i> biomass in the bamboo-dominated forests of SW Amazonia	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Yavit (2017)
E04	Preparação e caracterização de polpa celulósica de bambu <i>Guadua weberbaueri</i>	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Nunes et al. (2021)
E05	Estudio biométrico de fibras en tres especies de bambú – Estación Experimental UNCP Satipo – Junín	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Palomino e Jerry (2019)
E06	Propiedades físicas y mecánicas en los niveles longitudinales del culmo de tres especies del género <i>Guadua</i> nativa de la amazonia peruana	Caracterização de propriedades físicas e mecânicas	Sotelo e Alexander (2021)
E07	Modificações anatômicas e física de colmos de <i>Guadua</i> sp. submetidos a tratamentos preservativos convencionais e naturais	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Lobão et al. (2021)*
E08	Wood-bamboo Particleboard: Mechanical Properties	Aplicação: construção civil	Almeida et al. (2017)*
E09	Propriedades físicas dos bambus das espécies <i>Phyllostachys aurea</i> e <i>Bambusa tuldoidea</i> após tratamento térmico	Caracterização de propriedades físicas e mecânicas	Mbamu et al. (2020)*
E10	Potential of young bamboos for food industry: production of ingredients from the use of their culms and shoots	Aplicação: alimentação	Rusch et al. (2022)*
E11	Produção e utilização de nanofibras celulósicas de taboca (<i>Guadua</i> spp) para reforço de compósitos cimentícios	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Morais (2021)*, **
(continua)			

Tabela 2 - (continuação)

Identificação	Estudos	Área de concentração	Autor(es)
E12	Dinâmica do bambu (<i>Guadua weberbaueri</i> Pilger. Poaceae) em função da sazonalidade climática no leste do Acre	Aplicação: manejo florestal	Silva (2020)**
E13	Bambu nativo: alternativa de desenvolvimento econômico e sustentável para o estado do Acre	Aplicação: produtos e economia florestal	Afonso e Silva (2017)
E14	Evaluación del concreto f'c =175 kg/cm ² reforzado con fibras de <i>Guadua angustifolia</i> kunt, para mejorar su resistencia a la compresión. Moyobamba 2020-2021	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Palmira e Jhordan (2021)*
E15	Análisis de la sustitución de fibra de bambú (<i>Guadua angustifolia</i>) en fibra de vidrio de materiales compuestos en el sector automotriz de repuestos	Aplicação: industrial	Aruni (2022)**
E16	Identificação e isolamento de uma lectina do colmo da <i>Guadua angustifolia</i> Kunth (1822) (POALES: POACEAE)	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Gomes (2022)*, **
E17	Desenvolvimento de modelos biométricos para predição de biomassa aérea de plantios de <i>Dendrocalamus asper</i> (<i>Schultes f.</i>) <i>Backer ex Heyne</i> . (bambu-gigante)	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Balbino (2022)*, **
E18	Evolução molecular em <i>Bambusoideae</i> Luer. (<i>Poaceae</i> <i>Barnhart</i>): taxonomia molecular e caracterização de genoma plastidial de espécies nativas	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Zappellini (2022)*, **
E19	Desempenho estrutural e térmico de painéis modulares intertravados de matriz cimentícia com reforço estrutural de <i>Bambusa vulgaris</i>	Aplicação: construção civil	Neto (2021)*, **
E20	Painel modular intertravado de matriz cimentícia com reforço estrutural de <i>Bambusa vulgaris</i>	Aplicação: construção civil	Neto (2017)*, **
E21	Estratégias para a conservação ex situ de <i>Dendrocalamus asper</i> e micropropagação de espécies do gênero <i>Guadua</i> (Bambusoideae, Poaceae)	Aplicação: biotecnologia	Nogueira (2018)*
E22	Towards sustainable futures for nature and people	Aplicação: manejo florestal	Rando et al. (2021)*
E23	Caracterização do crescimento e composição química da parede celular de espécies nativas de bambus	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Parma (2017)*, **
E24	Estabelecimento e Cultivo de Células em Suspensão e Uso de Biorreatores como Estratégias de Propagação de Bambus do Gênero <i>Guadua</i>	Aplicação: biotecnologia	Queiroz (2021)*, **
E25	Breeding biology of the Olivaceous Flatbill (<i>Rhynchocyclus olivaceus</i>) in an Amazonian forest fragment of northwest Brazil	Aplicação: biotecnologia	Floriano, Lima e Guilherme (2020)*, **
(continua)			

Tabela 2 - (continuação)

Identi- ficação	Estudos	Área de concentração	Autor(es)
E26	Antioxidant and Photoprotective Properties of Neotropical Bamboo Species	Aplicação: biotecnologia	Grombone-Guaratini et al. (2021)*
E27	Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta densidade para uso estrutural	Aplicação: construção civil	Ferreira (2019)*,**
E28	Evaluacion y utilizacion de la <i>Guadua sarcocarpa</i> Londoño & Peterson en el bosque de la unu-macuya	Aplicação: manejo florestal	Cruz e Cárdenas (2011)*,***
E29	Bamboos flower after the return of an appropriate sun-moon phasing	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Clerget (2021)
E30	Non-Timber Forest Products in Brazil: A Bibliometric and a State of the Art Review	Aplicação: produtos e economia florestal	Silva et al. (2020)
E31	Tissue Cultured Regeneration and Ecological Values in Major Bamboo Species	Aplicação: biotecnologia	Sharma et al. (2022)*
E32	Caracterización ecológica de la gaita (<i>Rhipidocladum geminatum mcclure</i>) a fin de diseñar una estrategia de conservación para artesanos del municipio de Zetaquirá, Boyacá	Caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas	Triana e López (2022)*,**

Fonte: Organização dos autores.

Legenda: Para itens demarcados com (*): a espécie estudada não se relaciona à espécie de interesse do presente estudo, o termo de busca procurado apenas é citado com frequência ao longo do texto; (**): o estudo não possui indexação como artigo científico; e (***): apesar do descritor, o estudo está fora do período de análise em questão; (****): o artigo demonstrou resultados múltiplos em bases diferentes, sendo contabilizado apenas como 1 (uma) frequência. Sendo assim, os estudos com demarcação de (*) e/ou (***) foram retirados da análise.

De posse dos demais 10 estudos restantes selecionados para a análise, sinalizados em verde, por ordem de frequência entre as áreas, foram estabelecidas identificações. Assim, resultando na Tabela 03, que caracteriza as áreas de concentração dos 10 estudos, com suas respectivas identificações para as próximas análises.

Tabela 3 – Relação entre áreas de concentração e identificação das mesmas.

Áreas de concentração	Identificação
Caracterização de propriedades biológicas e/ou químicas	A01
Aplicação: produtos e economia florestal	A02
Caracterização de propriedades físicas e mecânicas	A03
Aplicação: manejo florestal	A04

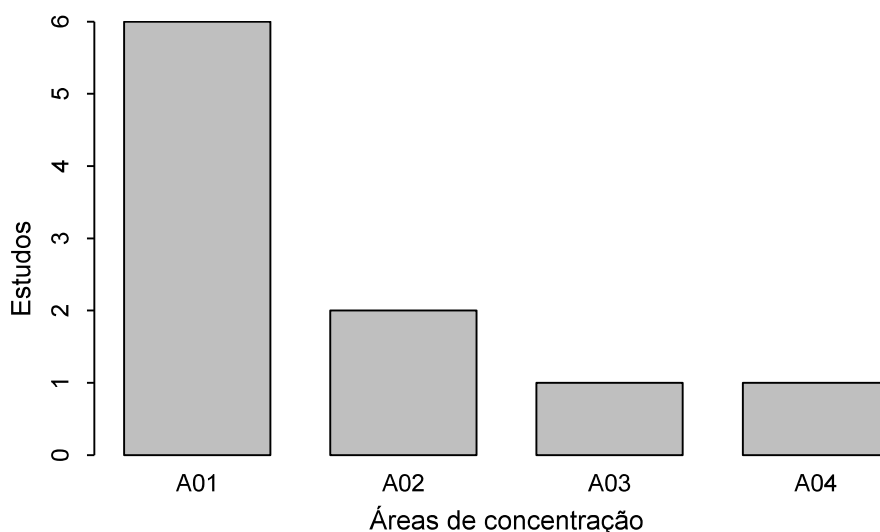
Fonte: Organização dos autores.

Legenda: Identificação correspondente às áreas encontradas nos resultados da revisão.

2.3 Análise gráfica

Com os resultados dos itens anteriores, foi possível realizar análises a partir de expressões gráficas. Para a execução dos gráficos foi utilizado o *software* R Studio versão 3.3.0. A Figura 1 relaciona os estudos conforme as áreas de concentração expressas anteriormente. Nela, nota-se a prevalência dos estudos na área de caracterização de propriedades biológicas e/ou químicas. Em seguida, os estudos de aplicação em produtos e economia florestal, constam mais resultados, porém em quantidade inferior aos estudos da A01. Ao fim, as demais quatro áreas figuram com estudos unitários sobre o tema.

Figura 1 – Estudos obtidos, por áreas de concentração.



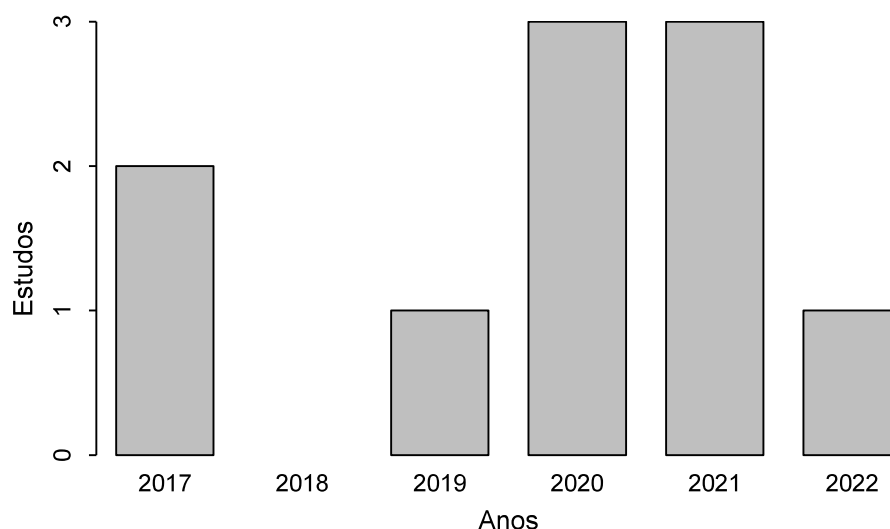
Fonte: Autores (2023)

Legenda: Os estudos catalogados foram organizados dentre das áreas de concentração, identificadas por A01 a A04.

Para o presente estudo, interessa a análise sob a ótica da aplicação para a construção civil. Porém, como nota-se da Figura 1 e da Tabela 2, que não foram obtidas análises da área procurada, que contemplem esta espécie, dentro da aplicação proposta. Embora, seja notável a possibilidade, uma vez que seja possível se confrontar, pela Tabela 1, estudo E08, no contexto proposto, o uso de *Dendrocalamus asper* no painel particulado de madeira-bambu, com utilização de nanocompósito dessa gramínea, aditivado com *Eucalyptus urophylla* (Almeida et al., 2017). Paralelamente, e ainda mais próxima da espécie em estudo, os estudos E11 e E14, que apropriam a incorporação de fibras de *Guadua spp.* e *G. angustifolia*, respectivamente, para reforço estrutural de compósitos cimentícios, obtendo, inclusive, resultados positivos para aumento de resistência mecânica à tração (Morais, 2021; Palmira; Jhordan, 2021).

Para os 10 estudos que contemplaram os critérios de análise propostos, ainda foi verificada sua análise cronológica, conforme expõe a Figura 02, com relação de estudos ao longo dos anos, no período proposto.

Figura 2 – Estudos obtidos, por ano de publicação ou vinculação em base de dados.



Fonte: Autores (2023)

Legenda: Os estudos catalogados foram organizados segundo os anos vinculados para análise da revisão, entre 2017 a 2022.

Nota-se pela Figura 2, que embora em 2018 não tenha estudos sobre o tema em questão, novos estudos vem sendo realizados com uma expectativa de crescimento na exploração acerca da temática. Considerando ainda que para 2022, a análise tenha atualizado os dados em outubro do corrente ano de 2023, pode-se notar uma crescente, em conjunto aos anos passados, reforçando a hipótese de que com o passar dos anos, o refino tecnológico tem possibilitado maior aplicação das espécies, ainda que não na área em pesquisa – construção civil, mas no panorama geral, há a expectativa de crescimento.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa por revisão sistemática atendeu aos objetivos esperados. Foi possível verificar que através do panorama de condições específicas de análise, no período proposto, as aplicações e consequentes áreas, requeridas a partir da fibra de *Guadua weberbaueri* em diferentes bases de dados, visando, primordialmente, utilização na construção civil.

A partir da revisão em quatro bases de dados indexadas, com uso de seis descritores, de natureza macro, até micro, para análise, considerou-se 32 estudos sobre a temática referida. Aplicados os critérios de seleção e análise, 10 estudos

apresentaram-se dentro do proposto sobre a espécie. Deles, verificou-se a concentração de estudos de natureza de caracterização de propriedades químicas e/ou biológicas, em contrapartida que sob a ótica da área de construção civil, não houve estudos.

Ainda, foi possível observar que as áreas de estudo sobre o tema vem se expandindo em 2020 e 2021, com expectativa de crescimento após esse período. Um forte sinal do avanço tecnológico e a exploração de alternativas para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

AFONSO, D. G.; SILVA, Z. A. G. P. G. **Bambu nativo: alternativa de desenvolvimento econômico e sustentável para o estado do Acre**. Bambus do Brasil, v. 1, n. 1, p. 290-306, 2017.

ALMEIDA, A. C.; ARAÚJO, V. A.; MORALES, E. A. M.; GAVA, M.; MUNIS, R. A.; GARCIA, J. N.; BARBOSA, J. C. Wood-bamboo Particleboard: Mechanical Properties. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 7784-7792, 2017.

ARUNI, M. G. R. **Análisis de la sustitución de fibra de bambú (*Guadua angustifolia*) en fibra de vidrio de materiales compuestos en el sector automotriz de repuestos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidad Católica San Pablo. Escuela Profesional De Ingeniería Industrial. 2022.

BALBINO, G. G. **Desenvolvimento de modelos biométricos para predição de biomassa aérea de plantios de *Dendrocalamus asper* (Schultes f.) Backer ex Heyne.(bambu-gigante)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2022.

BRAND, M. A.; GAA, A. Z. N.; BALDUINO JUNIOR, A. L.; CUNHA, A. B. da; RIOS, P. D. Potencial do uso de quatro espécies de bambu para a produção de carvão vegetal para uso doméstico. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 60–71, 2020. DOI: 10.5902/1980509827348. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/27348>. Acesso em: 5 set. 2022.

CASTRO, V. G. de; AZAMBUJA, R. da R.; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Influência de aditivos químicos na produção de compósitos madeira-cimento de duas espécies tropicais da Amazônia. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 1343–1353, 2019. DOI: 10.5902/1980509819497. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/19497>. Acesso em: 5 set. 2022.

CLERGET, B. Bamboos flower after the return of an appropriate sun-moon phasing. **BioRxiv: The Preprint Server for Biology**, 2021.

CRUZ, F. V. D. L.; CÁRDENAS, M. I. S. Evaluacion y utilizacion de la *Guadua sarcocarpa* londoño & peterson en el Bosque de la Unu-Macuya. **Revista Forestal de Ucayali**, v. 7, n. 1, 2011.

FERREIRA, J. P. L. **Estudo e desenvolvimento de protótipo de compósito de bambu de alta densidade para uso estrutural**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.

FLORIANO, D. D.; LIMA, J.; GUILHERME, E. Breeding biology of the Olivaceous Flatbill (*Rhynchocyclus olivaceus*) in an Amazonian forest fragment of northwest Brazil. **The Wilson Journal of Ornithology**, v. 132, n. 3, p. 587–597, 2020.

GOMES, C. A. de O. **Identificação e isolamento de uma lectina do colmo da *Guadua angustifolia* Kunth (1822)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas). Universidade Federal de Alagoas, Instituto De Ciências Biológicas e da Saúde, Alagoas, 2022.

GUARATINI, M. T. G.; FURLAN, C. M.; LOPES, P. S. Antioxidant and Photoprotective Properties of Neotropical Bamboo Species. **Plant Antioxidants and Health**, p. 1-35, 2021.

TRIANA, I. L. G.; LÓPEZ, A. D. **Caracterización ecológica de la gaita (*rhypidocladum geminatum* mcclure) a fin de diseñar una estrategia de conservación para artesanos del municipio de Zetaquirá, Boyacá**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Naturais e Educação Ambiental). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2022.

LILGE, D. S.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Avaliação do desempenho de painéis cimento-madeira fabricados com duas espécies florestais em combinação com casca de arroz. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 20–42, 2021. DOI: 10.5902/1980509810859. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/10859>. Acesso em: 5 set. 2022.

LOBÃO, M. S., GUEDES, F. T. P., DE SÁ, M. P., QUEIROZ, M. N., ROMEU, L. V. L., DE LIMA FERNANDES, N. C., TOMAZELLO FILHO, M. Modificações anatômicas e física de colmos de *Guadua* sp. submetidos a tratamentos preservativos convencionais e naturais. **Revista do Instituto Florestal**, v. 33 n. 11, 57-72, 2021.

MBAMU, M. F. A. O.; NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; JESUS, D. S.; JUNIOR, A. D. S. Propriedades físicas dos bambus das espécies *Phyllostachys aurea* e *Bambusa tuldoidea* após tratamento térmico. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 2, p. 85-92, 2020.

MORAIS, C. D. N. **Produção e utilização de nanofibras celulósicas de taboca (*Guadua* spp) para reforço de compósitos cimentícios**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia Para a Amazônia). Universidade Federal do Acre, Rio Branco – Acre, 2021.

MORAIS, W. W. C.; HASELEIN, C. R.; SUSIN, F.; VIVIAN, M. A.; SOUZA, J. T. de. USO DE *Bambusa tuldoidea* E *Eucalyptus grandis* PARA CONFECÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 746–757, 2018. DOI: 10.5902/1980509832088. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/32088>. Acesso em: 5 set. 2022.

NEGRÃO, A. G.; PINTO, E. M.; SILVA, L. B. Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro (*Ananas comosus*) para uso no ambiente construído. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 627-645, 2020.

NETO, J. A. G. **Desempenho estrutural e térmico de painéis modulares intertravados de matriz cimentícia com reforço estrutural de bambusa vulgaris**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – Paraíba, 2021.

NETO, J. A. G. **Painel modular intertravado de matriz cimentícia com reforço estrutural de Bambusa vulgaris**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Paraíba, 2017.

NOGUEIRA, J. S. **Estratégias para a conservação ex situ de Dendrocalamus asper e micropropagação de espécies do gênero Guadua (Bambusoideae, Poaceae)**. Tese (Doutorado em Botânica). Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal, 2018.

NUNES, M. R. S.; RAMOS, D. P.; MORAIS, C. D. N.; SENA, A. E. C.; RAMOS, A. L.; RODRIGUEZ, A. F. R.; FARIA, F. S. E. D. V. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE POLPA CELULÓSICA DE BAMBU *Guadua weberbaueri*: **TECNOLOGIA. South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 8, n. 2, p. 217-232, 2021.

PALMIRA, F. Z. T.; JHORDAN, R. T. **Evaluación del concreto $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ reforzado con fibras de guadua angustifolia kunt, para mejorar su resistencia a la compresión**. Moyobamba. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidad César Vallejo, Moyobamba – Perú, 2021.

PARMA, D. F. **Growth characterization and chemical composition of the cell wall of native species of bamboos**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Botânica). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - Minas Gerais, 2017.

PESCAROLO, A.; SILVA, S. H. L.; PINTO, M. C. C.; COSTA, M. R. M. M. A influência de microfibras de celulose no estado fresco de argamassas. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 1, p. 179-190, 2022.

PINHEIRO, C.G.G.; COSTA, M.R.N.; SOLA, G.S.; ALCANTARA, B.K. Evaluation of fiber quality from native amazonian bamboos *Guadua weberbaueri* and *Guadua aff. Lynncarkiae* for pulp and paper production. **Editora Científica Digital**, v. 10, p; 141-156, 2022.

QUEIROZ, F. F. **Estabelecimento e cultivo de células em suspensão e uso de biorreatores como estratégias de propagação de bambus do gênero Guadua**. Tese (Doutorado em Botânica). Universidade de Brasília, Brasília - Distrito Federal, 2020.

RANDO A. T. M., GONZÁLEZ-ROJÍ S.J., HURNI K., MATHEZ-STIEFEL S-L., MESSMER M., RAIBLE C.C., SNETHLAGE M., STOCKER T.F., FISCHER M. 2021. Towards sustainable futures for nature and people: An appraisal report for Madre de Dios, Peru. **Wyss Academy Report 1**, Wyss Academy for Nature, Bern, Switzerland, <https://doi.org/10.48350/161385>, 2021.

REIS, P. C. M. dos R.; SOUZA, A. L. de; REIS, L. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; MAZZEI, L.; REIS, A. R. S.; TORRES, C. M. M. E. Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia com base em propriedades físicas e mecânicas. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 336–346, 2019. DOI: 10.5902/1980509828114. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/28114>. Acesso em: 5 set. 2022.

RODRIGUES, Y. A. S.; SANTOS, S. K. F.; COSTA, F. H. S.; JUNIOR, J. B. O.; BARBOSA, S. B.; LOBÃO, M. S.; ALCÂNATARA, B. K. Anatomical characterization of the roots, leaves

and culms of *Guadua weberbaueri* in different growing environments. **Advances in Forestry Science**, v.7, n.2, p. 1025- 1033, 2020.

RUSCH, F.; ARAÚJO, V. A.; MORALES, E. A. M.; GAVA, M.; DOMENE, S. M. A.; BARBOSA, J. C. Potential of young bamboos for food industry: production of ingredients from the use of their culms and shoots. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, 2022.

SANTANA, G. M.; TRUGILHO, P. F.; BORGES, W. M. da S.; BIANCHI, M. L.; PAES, J. B.; NOBRE, J. R. C.; MORAIS, R. de M. Carvão ativado a partir de resíduos de bambu (*Bambusa vulgaris*) utilizando CO₂ como agente ativante para adsorção de azul de metileno e fenol. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 769–778, 2019. DOI: 10.5902/1980509828648. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/28648>. Acesso em: 5 set. 2022.

SHARMA, A.; MANPOONG, C.; GOHAIN, A.; PADU, G.; AKU, H. Tissue Cultured Regeneration and Ecological Values in Major Bamboo Species. **Preprints 2022**, doi: 10.20944/preprints202206.0072.v1, 2022.

SILVA, M. C. **Dinâmica do bambu (*Guadua weberbaueri* Pilger. Poaceae) em função da sazonalidade climática no leste do acre**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal do Acre, Programa de, Rio Branco – Acre, 2020.

SILVA, T. C.; ARAÚJO, E. C. G.; LINS, T. R. S.; REIS, C. A.; SANQUETTA, C. R.; ROCHA, M. P. Non-Timber Forest Products in Brazil: A Bibliometric and a State of the Art Review. **Sustainability** v. 12, n. 7151, 2020.

SOTELO, J. A. R. **Propiedades físicas y mecánicas en los niveles longitudinales del culmo de tres especies del género *Guadua* nativa de la Amazonia peruana**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal). Universidad Nacional de Ucayali Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Pucallpa - Perú, 2021.

YAVIT, N. Allometric derivation and estimation of *Guadua weberbaueri* and *G. sarcocarpa* biomass in the bamboo dominated forests of SW Amazonia. **BioRxiv: The Preprint Server for Biology**, 2017.

ZAPPELINI, J. **Evolução molecular em Bambusoideae Luer. (Poaceae Barnhart): taxonomia molecular e caracterização de genoma plastidial de espécies nativas**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais). Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

ZEVALLOS, A. **Estudio biométrico de fibras en tres especies de bambú – Estación Experimental UNCP Satipo – Junín**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidad Nacional del Centro del Perú – Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente – Huancayo – Perú, 2019.

Como citar este artigo

VIANA, T. H. DA C., SILVA, M. S. DA ., SENA, A. E. C., PETERS, L. P., MURAD, J. R. DE L., & RODRIGUEZ, A. F. R.. (2024). Applications of Guadua weberbaeuri fiber: a systematic review from the perspective of civil construction, between the years 2017 to 2022. **Ciência Florestal**, v. 34 n. 2, e72310. <https://doi.org/10.5902/1980509872310>

CAPÍTULO II

**Preparo e caracterização de nanofibras e nanocristais de celulose de
*Guadua weberbaueri***

REVISTA: CIÊNCIA E NATUREA (ISSN 2179-460X)

CLASSIFICAÇÃO QUALIS/CAPES (2017-2020): A3

SUBMISSÃO: 06/11/2023

ACEITE: 18/03/2024

PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOFIBRAS E NANOCRISTAIS DE CELULOSE DE *Guadua weberbaueri*

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF NANOFIBERS AND NANOCRYSTALS OF CELLULOSE FROM *Guadua weberbaueri*

RESUMO

A espécie *Guadua weberbaueri*, popularmente conhecida como bambu ou taboca, e abundantemente localizada na região de Acre, Amazônia brasileira, possui potencial de aplicação a ser explorado como reforço à compósitos cimentícios, na construção civil, necessitando caracterizações que expressem suas propriedades químicas e térmicas. Para tanto, foram executadas etapas preliminares para o preparo das nanofibras de celulose, a partir do pseudocaule do bambu, e através de vários processos como moagem, peneiramento, pré-tratamento, branqueamento, eliminação de hemicelulose e lignina para obtenção de celulose, hidrólise ácida de celulose para obtenção de nanofibras e nanocristais de celulose cristalina (NCC). As NCC foram caracterizadas por espectroscopia infravermelho, análises termogravimétricas e diferencial térmico, difração de raios-X, fluorescência de raios-X, espalhamento dinâmico de luz e teores de fibras e celulose. Os resultados indicaram nanomateriais com predominância cristalina, com estabilidade térmica até 300 °C, com ligações carbonáceas e com abundância de óxidos de sódio e sílicas, indicando um potencial de incorporação para compósitos cimentícios. Tal perspectiva a ser estudada em etapas posteriores pelos autores, visará aproximar ainda mais os campos de sustentabilidade, construção civil e nanotecnologia.

Palavras-chave: *Guadua weberbaueri*; Nanofibras e nanocristais de celulose; Compósitos; Caracterização; Amazônia.

ABSTRACT

The species *Guadua weberbaueri*, popularly known as bamboo or bamboo tree, and abundantly located in the region of Acre, Brazilian Amazon, has potential application to be explored as reinforcement of cementitious composites in civil construction, requiring characterizations that express its chemical and thermal properties. To this end, preliminary steps were carried out for the preparation of cellulose nanofibers, from the bamboo pseudostem, and through various processes such as grinding, sieving, pre-treatment, bleaching, elimination of hemicellulose and lignin to obtain cellulose, acid hydrolysis of cellulose to obtain nanofibers and crystalline cellulose nanocrystals (NCC). The NCCs were characterized by infrared spectroscopy, thermogravimetric and thermal differential analyses, X-ray diffraction, X-ray fluorescence, dynamic light scattering, and fiber and cellulose contents. The results indicated nanomaterials with crystalline predominance, with thermal stability up to 300 °C, with carbonaceous bonds and with an abundance of sodium oxides and silicas, indicating a potential for incorporation into cementitious composites. Such a perspective, to be studied in later stages by the authors, will aim to bring the fields of sustainability, civil construction and nanotechnology even closer.

Keywords: *Guadua weberbaueri*; Cellulose nanofibers and nanocrystals; Composites; Characterization; Amazônia.

1 INTRODUÇÃO

Durante esta última década, têm sido desenvolvidos novos nanomateriais de nanofibras para ser aplicado na construção civil na forma de nanofibras de bambu aplicando a nanotecnologia (Goetz *et al.*, 2022; Miranda *et al.*, 2022). Na área estrutural, espécies como *Pinus taeda*, *Cereus jamacaru* e *Bambusa vulgaris* vem sendo combinados em matrizes cimentícias para melhoria dos processos de hidratação na cura, contribuindo ao desenvolvimento de novos materiais (Miranda *et al.*, 2022).

Na interseção entre a construção civil, e a nanotecnologia, em coerência com a sustentabilidade, surge a incorporação de nanomateriais em matrizes estruturais, com tendência à cimentícia (Barbosa *et al.*, 2019; Campos *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2022; Mendes *et al.*, 2022). Partículas e fibras de açaí (*Euterpe oleracea* e *Euterpe precatoria*), indicaram viabilidade em base de reforço na composição de produtos compósitos reforçados (Barbosa *et al.*, 2019). Painéis de MDF produzidos a partir do particulado de *Eucalyptus grandis*, incorporado a nanopartículas de óxido de zinco, melhoraram os índices de resistência mecânica, demonstrando estabilidade no comportamento das propriedades físicas (Campos *et al.*, 2022). A madeira com características plásticas, desenvolvida com *Astrocaryum murumuru* Mart., apresentou consistência nos índices físicos e mecânicos correlatos (Lima *et al.*, 2022). A nanocelulose empregada através de compósitos cimentícios, refletiu efeitos de melhoria no desempenho mecânico, produzidos em traço controle (Mendes *et al.*, 2022).

Ao passo da utilização crescente dos compósitos, em base de celulose, os índices de lignina, enquanto composto orgânico, devem ser baixos (Rambo *et al.*, 2015; Jesus *et al.*, 2019; Sasamori *et al.*, 2022). Para controle e verificação dos índices de compostos como a lignina, hemicelulose e a própria celulose, análises termogravimétricas analisam biomassas vegetais (de capim, café, engaço de banana e açaí) e seus índices de degradação correlacionados aos compostos lignocelulósicos (Rambo *et al.*, 2015). Usando poliestireno expansível a base de bagaço de cana de açúcar, as análises termogravimétricas e de termogravimetria diferencial, identificaram pontos de estabilidade no comportamento térmico e degradação parcial da massa (Jesus *et al.*, 2019). No caso do polímero polietileno,

obtido da madeira *Pinus eliotti*, a análise térmica apresentou alta presença de lignina, para ser aplicado em embalagens e subprodutos (Sasamori *et al.*, 2022).

A partir dos estudos supracitados, é possível notar que os materiais de origens vegetais têm potencial aplicação na construção civil (Morais, 2021; Alvarenga *et al.*, 2022; Pescarolo *et al.*, 2022). Compósitos de gesso, incorporados a fibras de *Bambusa tuldooides*, obtiveram desempenho mecânico dentro do esperado com melhoria no aumento da resistência (Alvarenga *et al.*, 2022). As espécies *Guadua spp.* obtiveram potencial mecânico para incorporação no compósito cimentício, em forma de nanofibras, proporcionaram aumento nos índices de resistência mecânica a tração e compressão (Morais, 2021). Surgem também as microfibras que são adicionadas às argamassas gerando compósitos microfibrados (Pescarolo *et al.*, 2022).

Diante do exposto, o estudo propõe, como fator de novidade e relevância, a síntese de nanofibras e nanocristais a partir de uma espécie de bambu nativa e abundante no estado do Acre (Amazônia/Brasil), com potencial ainda pouco conhecido, para a indústria da construção civil.

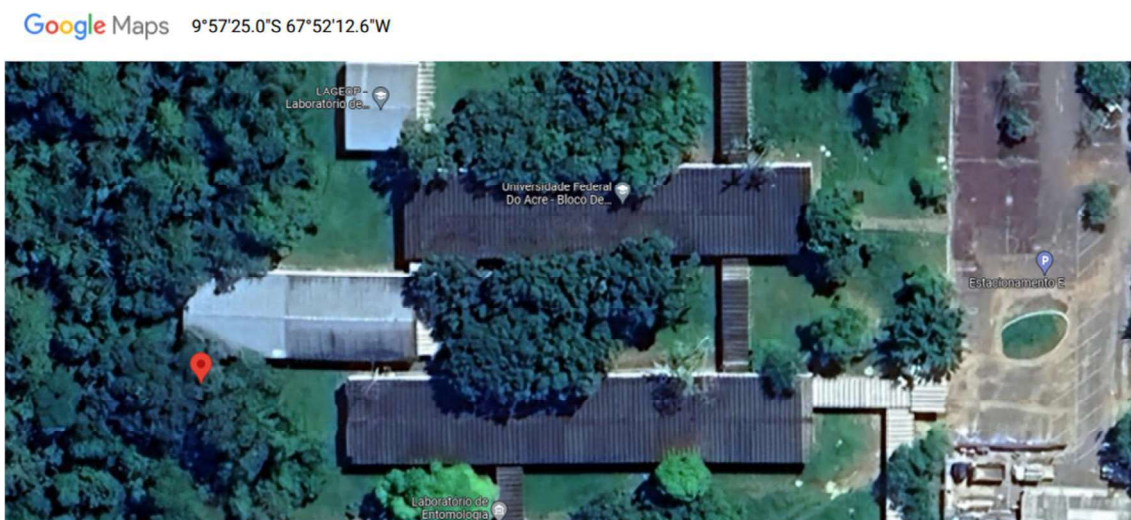
O objetivo do presente estudo é preparar e caracterizar as nanofibras e nanocristais de celulose do *Guadua weberbaueri* na forma química e térmica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Etapas preliminares

A coleta das varas e colmos de bambu ocorreu nas localidades da Universidade Federal do Acre, Parque Zoobotânico (Figura 1), sob as coordenadas 9°57'25.0"S 67°52'12.6"W, onde foram coletadas cerca de 6 varas, com comprimento médio de 3 m, e diâmetro variável.

Figura 1 – Coordenadas geográficas do local de coleta das varas de bambu *Guadua weberbaueri*.



Fonte: Google Maps (2023)

Legenda: Coordenadas geográficas do local de coleta das varas de bambu *Guadua weberbaueri*, no Parque Zoobotânico, Universidade Federal do Acre

A caracterização da espécie se deu a partir da formulação de exsicata, sob o número de identificação de tombamento N° UFACPZ 28061, contendo folha e caule de bambu (Figura 2), com tombamento no Herbário da Universidade Federal do Acre, no Parque Zoobotânico do Campus Rio Branco (Pereira, 2012).

Figura 2 – Exsicata para identificação de espécie, contendo folha e caule do bambu
Guadua weberbaueri.



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2022)

Legenda: Exsicata executada para devido identificação de espécie do bambu *Guadua weberbaueri*, junto ao Herbário do Parque Zoobotânico, Universidade Federal do Acre

Os colmos foram limpos de resíduos orgânicos utilizando lavagem com água corrente, além de passarem por remoção de espinhos, galhos e folhagens remanescentes. Os colmos foram cortados nas dimensões 5 cm x 10 cm (Figura 3-a), aproximadamente, e então passaram para a etapa de secagem por ventilação natural inicial e depois em estufa, à 70 °C, por 48 h (Auersvaldt; Lay; Miranda, 2019; Brito *et al.*, 2015).

Após a secagem, os colmos obtidos foram levados para o moinho de facas, onde moídos (Figura 3-b), constituíram a amostra de bambu triturado (amostra BT) (Arrais *et al.*, 2016). Após moídos, deu-se início ao processo de produção da polpa, através da execução de deslignificação e branqueamento (Morais, 2021; Cordeiro *et al.*, 2014; Correia, 2011; Pego; Bianchi; Veiga, 2019).

Figura 3 – (a) Bambu cortado para moagem; (b) bambu moído.



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2022)

Legenda: (a) Bambu lavado e cortado em dimensões menores para trituração posterior; (b) bambu triturado em forma de pó

2.2 Produção de amostras e tratamentos químicos

Após a secagem, os colmos obtidos foram levados para o moinho de facas, onde moídos, constituíram a amostra de bambu triturado (amostra BT) (Arrais *et al.*, 2016). Após moídos, deu-se início ao processo de produção da polpa, através da execução de deslignificação e branqueamento (Morais, 2021; Cordeiro *et al.*, 2014; Correia, 2011; Pego; Bianchi; Veiga, 2019).

Para deslignificação, foi executado o método com solução de NaOH a 2%, na proporção distribuição de 10 g de bambu para 400 mL de solução, durante 4 h a 80 °C e agitação mecânica a velocidade constante, por 4 repetições (Morais, 2021; Machado *et al.*, 2014; Nunes *et al.*, 2021). Ao fim de cada repetição, a amostra foi lavada com água destilada em quantidade abundante, em tamis de malha com abertura 105 μ m. Dessa etapa, origina a amostra de polpa deslignificada de celulose (amostra PDC).

Em sequência, foi executado o branqueamento, etapa responsável por diminuir resíduos de lignina e hemicelulose restantes da etapa anterior, utilizando H₂O₂ a 24% (v/v), bem como NaOH a 4% (m/m) (1:1), seguindo a proporção de

distribuição de 1 g de fibra para 20 mL da solução, durante 2 h a 50 °C de temperatura e agitação mecânica a velocidade constante (Morais, 2021; Cordeiro *et al.*, 2014). Ao fim de cada repetição, a amostra foi lavada com água destilada em quantidade abundante, em tamis de abertura 105 μ m. Dessa etapa, origina a amostra de polpa branqueada de celulose (amostra PBC).

Com as amostras foi executada a hidrólise ácida, para a quebra da celulose, em estado com menos impurezas devido a etapa anterior. Preparada em solução de H₂SO₄ a 64%, na proporção de 1 g de polpa, 8,00 mL de ácido e 8,00 mL de água destilada, com a agitação mecânica a velocidade constante a 45 °C, durante 35 minutos. Ao fim da hidrólise, foi utilizada a proporção de 1 g de polpa para 20 mL de água destilada a 5 °C para neutralizar a reação (Samir; Alloin; Dusfrene, 2005; Rosa *et al.*, 2010).

A amostra foi centrifugada durante 30 minutos, em 5 ciclos na centrífuga microprocessadora (marca Quimis). Em seguida, ela foi lavada com água destilada e filtrada com uso de papel filtro quantitativo tipo C42 faixa azul, de filtração lenta. Após a lavagem, a amostra foi colocada em banho ultrassom durante 30 minutos em equipamento da marca Quimis, através de acondicionamento de solução aquosa da amostra sólida, diluída, em béquer, dentro do equipamento. Após essas etapas, a amostra foi acondicionada em potes e congelada para então seguir para o liofilizador. A liofilização, processo de retirada da água em estado sólido (congelada) diretamente para o gasoso, foi realizada no equipamento L101, marca Liotop, aonde permanece a -60 °C, durante 96 a 120 h (Costa *et al.*, 2017). Ao fim desse processo, é obtida a amostra de nanocristais de celulose (amostra NCC) (Figura 4).

Figura 4 – Amostras PDC (coloração marrom clara); PBC (coloração branca) e NCC (coloração marrom escuro).



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2022)

Legenda: Amostra PDC em coloração marrom claro; amostra PBC em coloração branca; amostra NCC em coloração marrom escuro. As amostras PDC e PBC encontram-se na forma de grânulos maiores e a amostra NCC em forma de pó.

2.3 Análises

2.3.1 Distribuição de diâmetros de partículas

Com as amostras, inicialmente foi realizada análise de espalhamento dinâmico de luz (DLS) para determinar os diâmetros hidrodinâmicos das partículas, através da intensidade e volume da amostra. A amostra NCC, tratamento final, foi analisado a partir de 3 condições para melhoria na obtenção dos resultados: NCC-C, amostra após centrifugação; NCC-S amostra apenas solubilizada; NCC-L, amostra após liofilização. A leitura ocorreu por meio da diluição das amostras, na proporção de 0,005 g de amostra para 1 mL de água destilada, submetendo então a solução aquosa à leitura do aparelho (Silvestro *et al.*, 2023). O equipamento é da marca Malvern, com especificação ZETASIZER NANO - ZS90.

2.3.2 Cristalização de amostras

As medidas de Difração de Raios-X (DRX) foram realizadas em equipamento difratômetro, com tensão de 30 kV, faixa de análise entre 3 e 80°, utilizando filamento de cobre, utilizando difratômetro de raios-X BRUKER (modelo D2 PHASER, radiação-K α), e grau de leitura de 2°/min, no modo de leitura contínua (Bilcati; Costa; Paulino, 2022). Para o programa SHIMADZU (Pmgr) foi utilizado determinar as fases presentes com o banco de dados JCPDS. O preparo das amostras foi realizado pelo método do pó prensado aleatoriamente no porta-amostras.

2.3.3 Teor de fibras e celulose

Para a caracterização química das amostras, foi necessário dividir o composto celular, da parede celular. O método utilizado foi o FDN/FDA, com base em detergente neutro e detergente ácido (Van Soest; Robertson; Lewis, 1991; Machado *et al.*, 2014; Nunes *et al.*, 2021; Moraes, 2021).

Inicialmente, as amostras foram aquecidas a 70 °C imersa na solução de detergente neutro. Em sequência, foi separada por filtragem para retirada da parede celular. Assim, separou-se o composto celular, da parede (Van Soest, 1991; Moraes, 2021).

Utilizou-se então o detergente ácido para dissolver a celulose, e então retirar por filtragem, os demais compostos da fração, através de filtragem (Moraes, 2021).

2.3.4 Caracterização de ligações de compostos

A relação entre as ligações dos compostos constituintes das amostras foi feita utilizando a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) (RIBEIRO, 2016). A análise consistiu em 16 exames, em faixas de comprimento de onda de 400 a 4000 cm⁻¹ Moraes, 2021; Nunes *et al.*, 2021), utilizando um espectrômetro modelo Vertex 70 da BRUKER. O preparo da amostra foi realizado dispersando-a diretamente no laser de leitura do equipamento.

2.3.5 Caracterizações térmicas

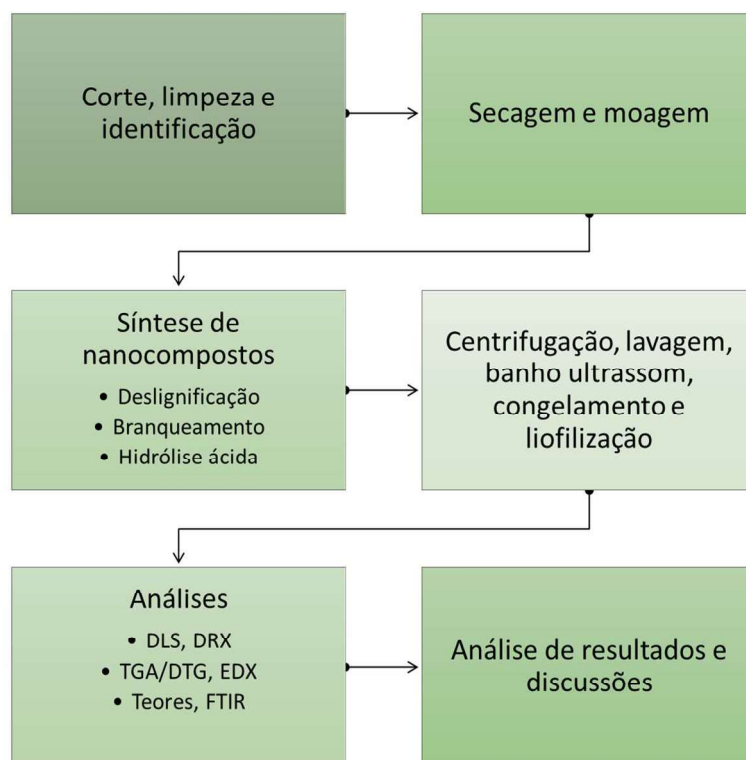
Para analisar o comportamento das amostras, em condições de variação de temperatura, foi realizada a análise termogravimétrica (TGA) e diferencial térmico da amostra (DTG) (Cordeiro et al., 2014; Ribeiro, 2016; Júnior, 2012). Foi utilizado um calorímetro, com taxa de 10 °C/min até a temperatura de 600 °C (Morais, 2021; Nunes *et al.*, 2021). No DTG, foi utilizada a amostra em atmosfera de nitrogênio, com taxa de 100 mL/min (Nunes *et al.*, 2021).

2.3.6 Caracterização de elementos e compostos constituintes

Para determinar a composição química dos elementos e compostos que constituem as amostras, foi realizada análise por espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX), utilizando atmosfera de vácuo, no equipamento EDX-720, da marca SHIMADZU, com leitura em dois canais, no canal Ti-U com análise em 50 kV e no canal Na-Sc com análise em 15 kV, em atmosfera de vácuo e com colimador de 10 mm (Rodrigues; Sousa; Olivier, 2022). O preparo da amostra foi do tipo tablet: a amostra, na forma de pó, foi prensada com o auxílio de uma prensa mecânica e uma força de 5 toneladas por 1 minuto.

A síntese das etapas executadas se relaciona com o fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Síntese de etapas executadas no decorrer do estudo.



Fonte: Acervo particular dos autores (julho de 2023)

Legenda: Etapas executadas ao longo do estudo: compreendendo etapas iniciais, de corte à moagem; etapas de preparação de amostras, desde deslignificação à liofilização; etapas de análises e finalização com resultados e discussões

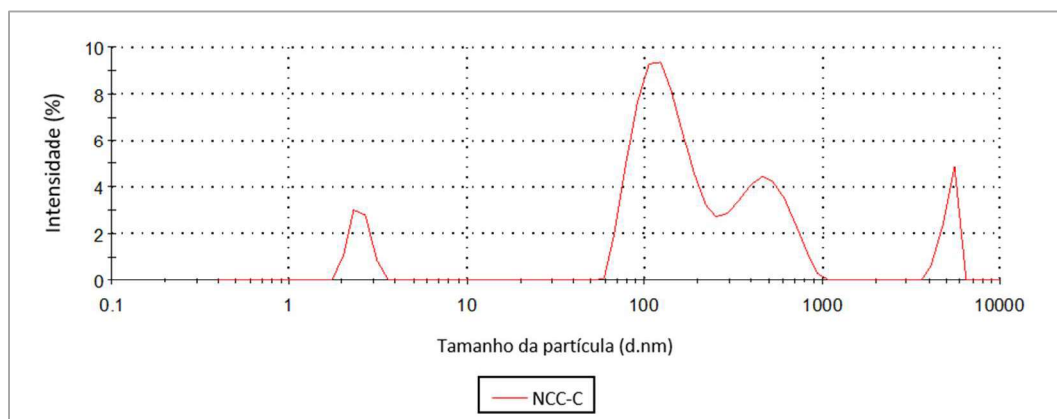
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados

3.1.1 Distribuição de diâmetros de partículas

Nas Figuras 6 e 7, a análise de Zetasizer para a amostra NCC-C, quanto à distribuição de tamanho por intensidade, demonstrou quatro picos de distribuição de tamanho. A 3% da amostra, foram verificadas partículas com 2,50 nm de diâmetro; a 9%, foram verificadas partículas com 110 nm de diâmetro; a 4,20%, foram verificadas partículas com 450 nm; a 5%, foram verificadas partículas com 5000 nm. Este último, em virtude da amplitude, é desprezado. A análise quanto à distribuição por volume, apresentou comportamento uniforme para a distribuição do pico, que foi apenas um. Nesse pico, 30% da amostra indicou diâmetro de 1,50 nm.

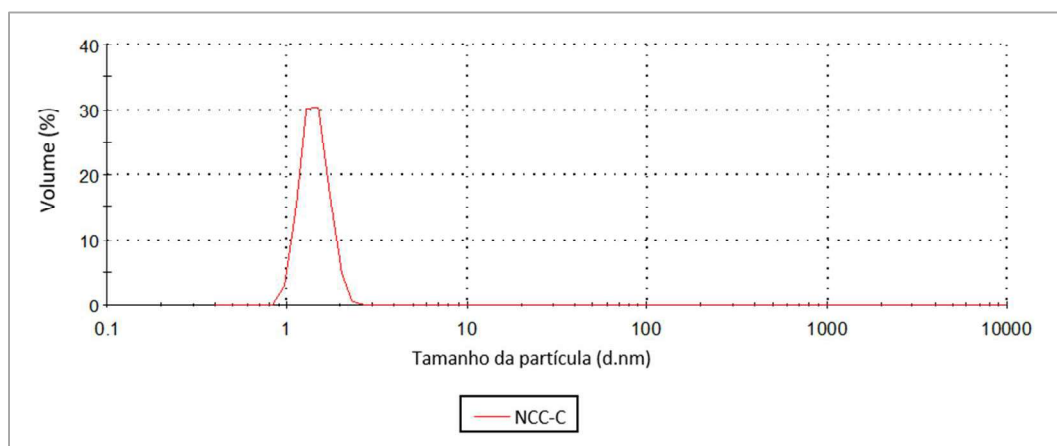
Figura 6 – Distribuição de tamanhos de partículas por intensidade da amostra NCC-C



Fonte: Acervo particular dos autores (janeiro de 2023)

Legenda: Distribuição de tamanho de partículas por intensidades da amostra NCC-C, com visualização de bandas que variam até 10000 nm

Figura 7 – Distribuição de tamanhos de partículas por volume da amostra NCC-C



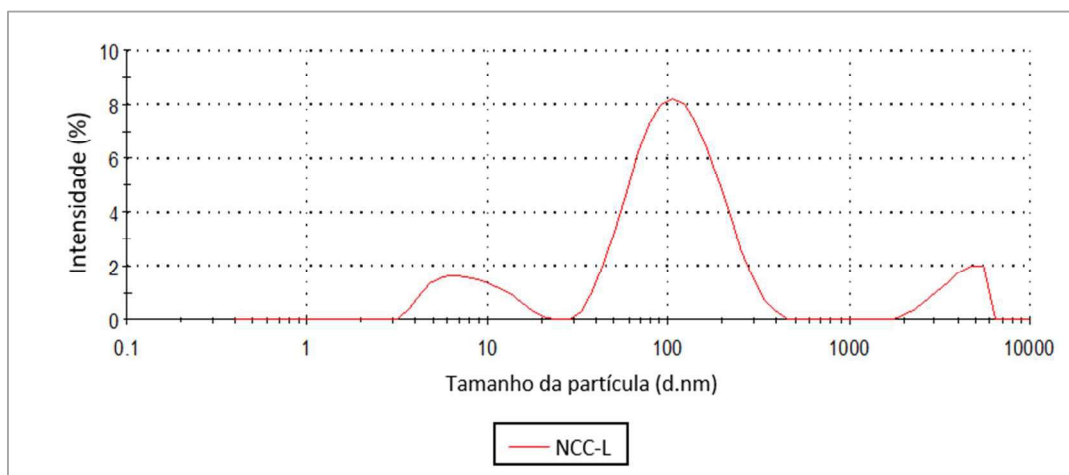
Fonte: Acervo particular dos autores (janeiro de 2023)

Legenda: Distribuição de tamanho de partículas por volume da amostra NCC-C, com visualização de bandas que variam até 10000 nm

Nas Figuras 8 e 9, a análise de Zetasizer para a amostra NCC-L, quanto à distribuição por intensidade, demonstrou três picos de distribuição. A 1,50% da amostra, foram verificadas partículas com 6 nm de diâmetro; a 8%, foram verificadas partículas com 110 nm de diâmetro; a 2%, foram verificadas partículas com 5500,00 nm. Este último, em virtude da amplitude, é desprezado. A análise quanto à distribuição por volume, apresentou comportamento uniforme para a

distribuição do pico, que foi apenas um. Nesse pico, 20% da amostra indicou diâmetro de 4,75 nm.

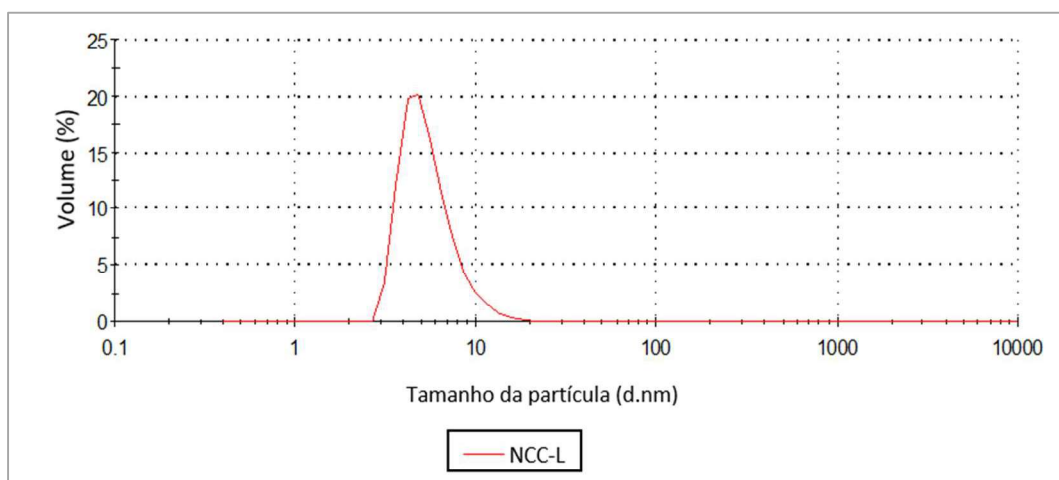
Figura 8 – Distribuição de tamanhos de partículas por intensidade da amostra NCC-L.



Fonte: Acervo particular dos autores (janeiro de 2023)

Legenda: Distribuição de tamanho de partículas por intensidade da amostra NCC-L, com visualização de bandas que variam até 10000 nm

Figura 9 – Distribuição de tamanhos de partículas por volume da amostra NCC-L



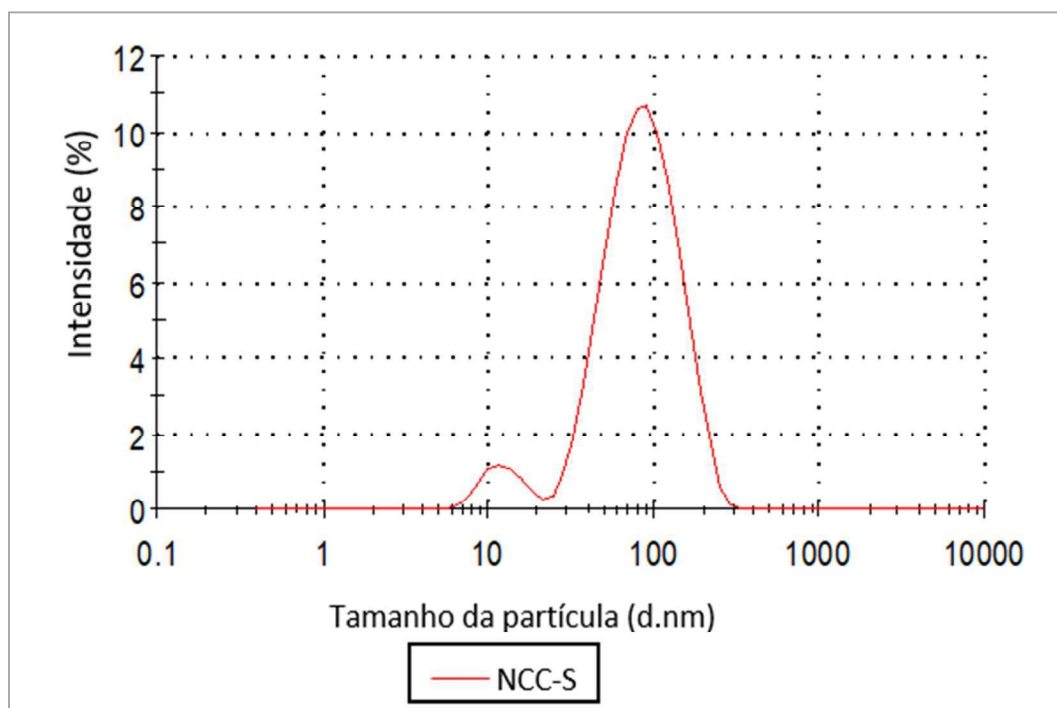
Fonte: Acervo particular dos autores (janeiro de 2023)

Legenda: Distribuição de tamanho de partículas por volume da amostra NCC-L, com visualização de bandas que variam até 10000 nm

Nas Figuras 10 e 11, a análise de Zetasizer para a amostra NCC-S, na distribuição do diâmetro hidrodinâmico por intensidade, demonstrou dois picos de distribuição. A 1% da amostra, foram verificadas partículas com 12 nm de diâmetro; a 10,75%, foram verificadas partículas com 89 nm de diâmetro. A

análise quanto à distribuição por volume, apresentou comportamento uniforme para a distribuição de um pico e comportamento mais difuso para outro. Nesse primeiro pico, 18% da amostra indicou diâmetro de 9 nm; no pico mais difuso, 1,25% da amostra indicou diâmetro de 42 nm.

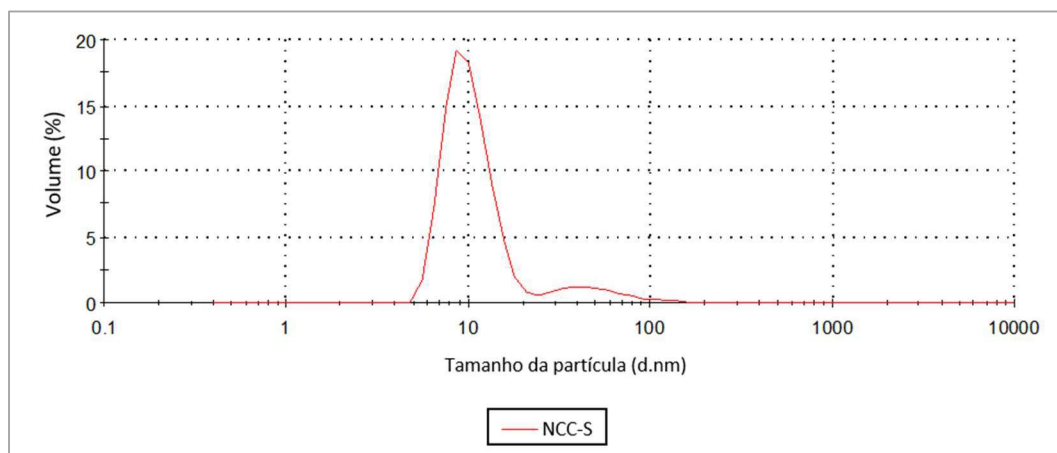
Figura 10 – Distribuição de tamanhos de partículas por intensidade da amostra NCC-S.



Fonte: Acervo particular dos autores (janeiro de 2023)

Legenda: Distribuição de tamanho de partículas por intensidade da amostra NCC-S, com visualização de bandas que variam até 10000 nm

Figura 11 – Distribuição de tamanhos de partículas por volume da amostra NCC-S.



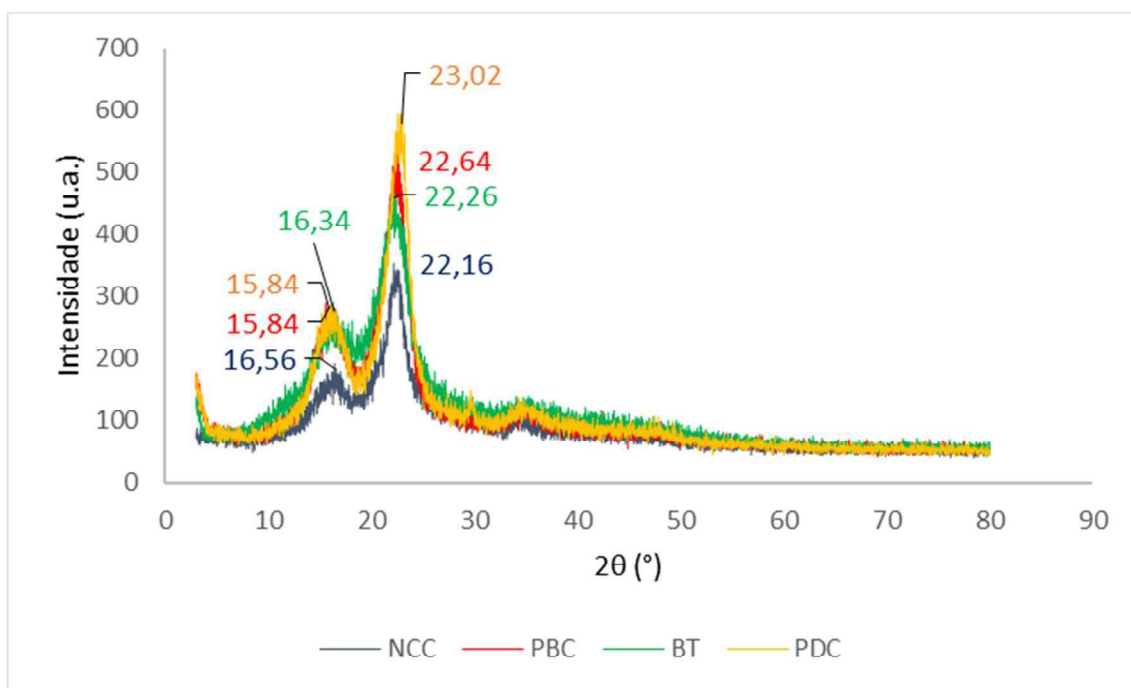
Fonte: Acervo particular dos autores (janeiro de 2023)

Legenda: Distribuição de tamanho de partículas por volume da amostra NCC-S, com visualização de bandas que variam até 10000 nm

3.1.2 Difração de raios-X

Na Figura 12, as medidas de DRX apontam as características de cristalização das amostras. De maneira geral, as amostras demonstraram os comportamentos através de dois picos, bem definidos, com alta intensidade em relação aos demais pontos das amostras verificadas. Os picos da amostra BT se encontraram $2\theta=16,34^\circ$ e $22,26^\circ$; a amostra PDC demonstrou os picos de $2\theta=15,84^\circ$ e $23,02^\circ$; a amostra PBC sinalizou picos em $2\theta=15,84^\circ$ e $22,64^\circ$ e a amostra NCC sinalizou picos em $2\theta=16,56^\circ$ e $22,16^\circ$. É possível notar a uniformização do comportamento, conforme os picos se alinham em regiões 2θ próximas, permitindo indicativos de características similares, apesar das variações levemente distintas ao longo de suas composições lidas.

Figura 12 – Difratoograma de raios-x das amostras.



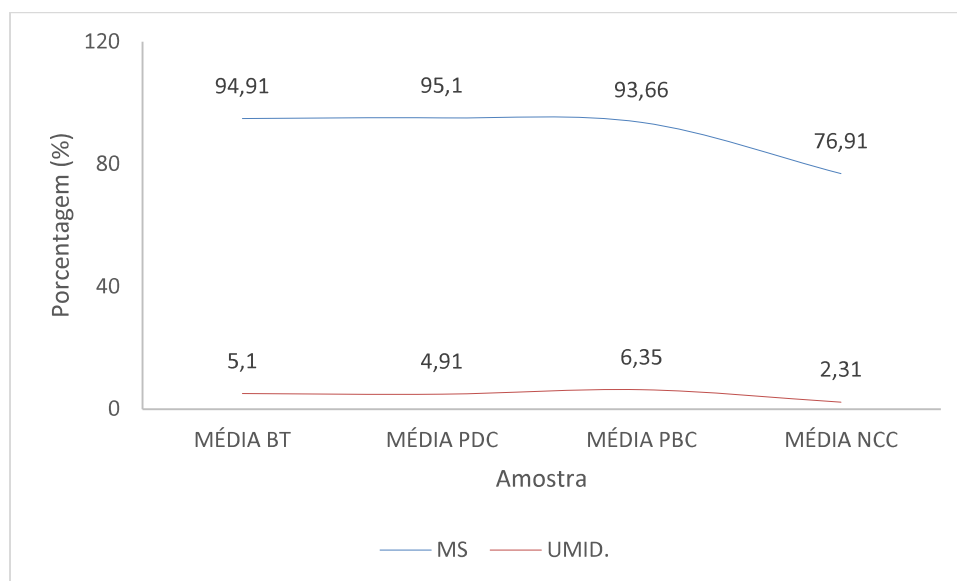
Fonte: Acervo particular dos autores (agosto de 2023)

Legenda: Leituras DRX da amostra trazendo indicativos da cristalinidade para os quatro tipos de amostras ao longo dos tratamentos executados no processo de síntese

3.1.3 Teor de fibras e celulose

Na Figura 13, as amostras retratam as etapas do tratamento químico utilizado, com amostra *in natura* BT, amostra com tratamento inicial PDC, amostra com tratamento intermediário PBC e amostra com tratamento completo finalizado NCC. As médias encontradas, relativas a três repetições do estudo, mostram o comportamento dos teores de matéria seca (MS) e de umidade (UMID) das respectivas amostras. A análise aponta para diminuição dos teores supracitados, sendo máximos na amostra BT (com 94,91 e 5,1%, respectivamente), decaindo aos valores mínimos ao final do tratamento, na amostra NCC (76,91 e 2,31%).

Figura 13 – Teores de matéria seca e umidade média presentes nas amostras.

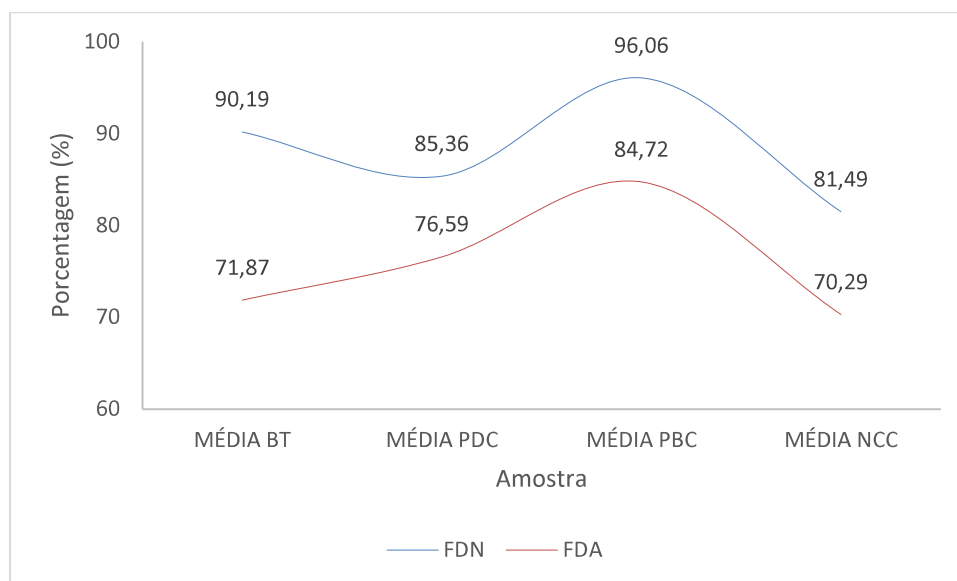


Fonte: Acervo particular dos autores (fevereiro de 2023)

Legenda: Teores médios de matéria seca e umidade para os quatro tipos de amostras ao longo dos tratamentos executados no processo de síntese

Na Figura 14, os teores dos componentes das fibras, sendo eles celulose, lignina e hemicelulose, são preliminarmente verificados nessa análise. Enquanto os compostos de celulose e lignina se relacionam com a solubilidade de fibras em detergente ácido (FDA). A hemicelulose, no entanto, se relaciona também com a solubilidade de fibras em detergente neutro (FDN), além da FDA. Revelando a natureza desses compostos ao longo dos tratamentos empregados na amostra. Para as fibras FDN, o comportamento indicando reflete picos no teor, tendo na amostra final NCC, o seu menor valor, de 81,49%, em confronto ao seu maior valor, ainda no tratamento da amostra PDC, com 96,06%. De maneira similar, com ressalvas interpretativas, as fibras FDA possuem valor crescente, desde a *in natura*, 71,87%, até o pico exposto no tratamento intermediário da amostra PDC, 84,72%. No tratamento final da amostra de NCC, todavia, o teor assume seu menor percentual, chegando a 70,29%. Ambos os comportamentos FDN e FDA demonstram a necessidade de demais análises sobre a natureza desses compostos encontrados.

Figura 14 – Teores médios de fibras FDN e FDA presentes nas amostras.

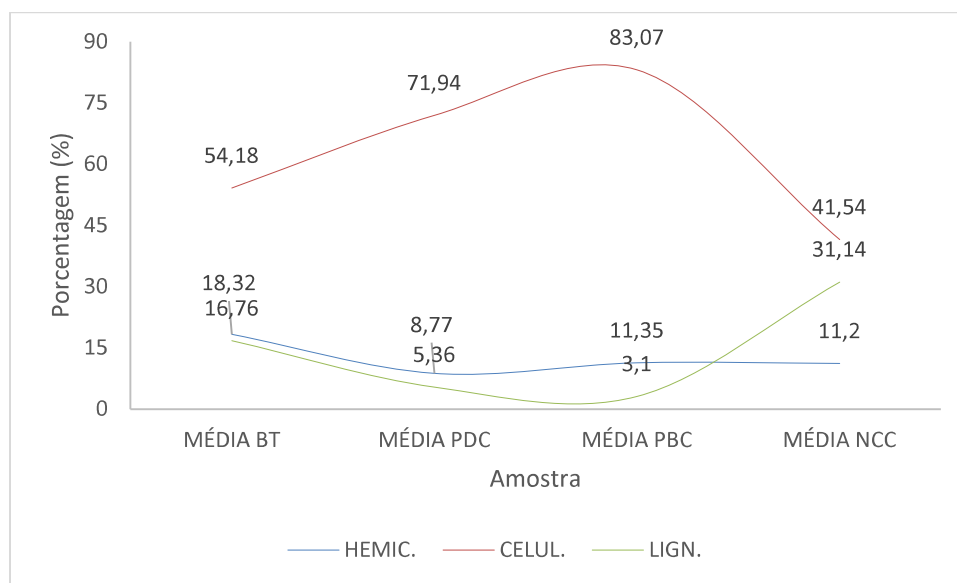


Fonte: Acervo particular dos autores (fevereiro de 2023)

Legenda: Teores médios de fibras FDN e FDA para os quatro tipos de amostras ao longo dos tratamentos executados no processo de síntese

Na Figura 15, os teores de celulose, hemicelulose e celulose são indicados. A lignina apresenta comportamento aproximadamente extremista à análise de teor de fibras FDN/FDA, tendo o pico inicial de 16,76% da amostra BT, sendo diminuído ao menor valor pelo tratamento de PBC, 3,10%, e tendo pico máximo na amostra de NCC, com 31,14%. Para a hemicelulose, o comportamento é aproximadamente decrescente, com o valor máximo sendo inicial da amostra BT, 18,32%, reduzido a 11,20% na amostra NCC, que mesmo não sendo o valor mínimo expresso pela amostra, configura entre os mínimos. Ao fim, de forma invertida os demais comportamentos, o teor de celulose é crescente ao ponto máximo do tratamento PBC, 83,07%, ligeiramente sendo diminuído ao valor mínimo de 41,54%, expresso na amostra NCC. A partir dessa relação atípica de teores em relação aos respectivos tratamentos, urge a necessidade de análises complementares, expostas posteriormente.

Figura 15 – Teores de celulose, lignina e hemicelulose presentes nas amostras.



Fonte: Acervo particular dos autores (fevereiro de 2023)

Legenda: Teores médios de celulose, lignina e hemicelulose para os quatro tipos de amostras ao longo dos tratamentos executados no processo de síntese

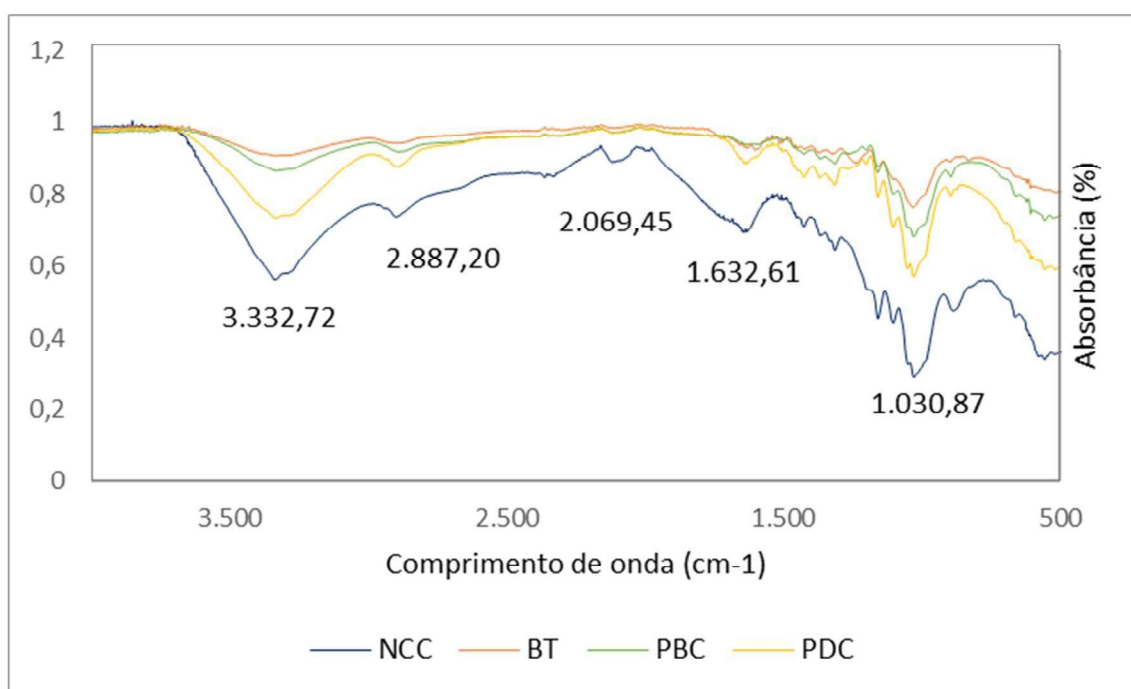
3.1.4 Caracterização de ligações de compostos

Na Figura 16, o espectro de FTIR para os quatro tratamentos das amostras BT, PDC, PBC e NCC são mostradas. Visivelmente, verifica-se que o material das amostras, por corresponder ao mesmo em diferentes etapas, demonstrou o mesmo comportamento em termos de bandas, com alteração de diminuição nas absorbâncias correspondentes à cada amostra. Sendo máxima na amostra *in natura* BT, e mínimo quando indicada na amostra NCC, com tratamento final. Em relação às bandas, encontram-se como comuns às quatro amostras, de modo que esse fator se torna interessante em sua análise, por demonstrar que os compostos ali presentes, permanecem inertes, ao longo das etapas de tratamentos, mas ainda significativos ao desempenho das amostras estudadas. As bandas, comuns e mais expressivos ao longo do tratamento das amostras, se expressam nas regiões de comprimentos de onda equivalentes a $3.332,72\text{ cm}^{-1}$ (A), $2.887,20\text{ cm}^{-1}$ (B), $1.632,61\text{ cm}^{-1}$ (C) e $1.030,87\text{ cm}^{-1}$ (D).

De maneira correlata a outros estudos, é possível se verificar e interpretar a incidência de cada pico. No pico A, sua ocorrência implica na presença de grupos dos tipos OH, CH₃, CH₂ e CH, oriundos dos processos que degradam a hemicelulose da amostra (Dias Júnior *et al.*, 2019). No pico B, verifica-se alteração da cristalinidade da celulose, correspondente a presença de ligações de (C–H) e

(O–H) (Dias Júnior *et al.*, 2019). O pico C indica a vibração do grupo C=O, resultantes dos compostos intrínsecos da lignina e da celulose restantes nas amostras (Dias Júnior *et al.*, 2019). O pico D, o decrescimento indica que compostos da celulose e lignina iniciam processo de decomposição, enfatizando a existência dos resíduos carbonáceos resultantes das ligações anteriormente indicadas (Dias Júnior *et al.*, 2019). Esses resultados se relacionam com os vistos nas análises de teor de celulose, lignina e hemicelulose, anteriormente vista.

Figura 16 – Espectro de FTIR para as amostras no espectro de 400 a 4000 cm^{-1} .



Fonte: Acervo particular dos autores (maio de 2023)

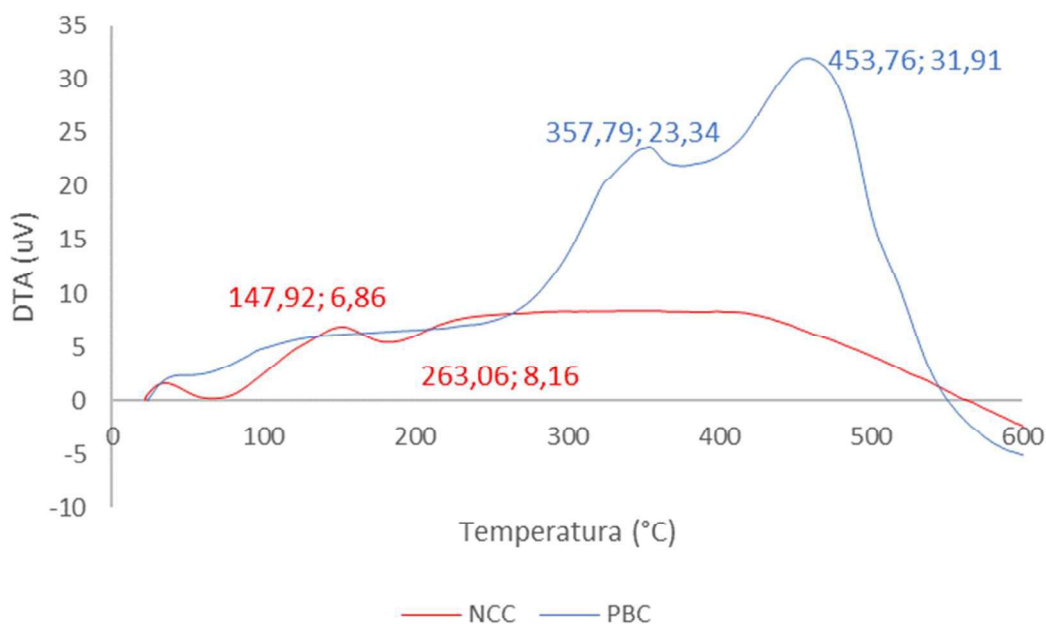
Legenda: Leitura FTIR para os quatro tipos de amostras ao longo dos tratamentos executados no processo de síntese, nas varreduras que variam até 4000 cm^{-1}

3.1.5 Caracterizações térmicas

Na Figura 17, o comportamento das amostras NCC e PBC (escolhidas por comportarem os tratamentos finais), são mostrados em relação à variação térmica diferencial. Na amostra PBC, é possível observar que em temperaturas até 300 °C, ocorre perda de massa na amostra, ao passo que em 357,79 °C e 453,76 °C, ocorre eventos exotérmicos oriundos de mudança de fase nas características da amostra. A partir do último pico, inicia-se o processo de decomposição da amostra até a temperatura final de 600 °C. Para a amostra NCC, a alteração inicial da linha de base por degradação de massa da amostra, ocorre aproximadamente até 147,92 °C,

com estabilidade a partir de 263,06 °C, sem variações consideráveis da linha de base, indicando inércia aos eventos exotérmico e endotérmico até cerca de 400 °C, onde então inicia-se o processo de decomposição da amostra, até a temperatura final de 600 °C.

Figura 17 – Análise de variação térmica diferencial das amostras.



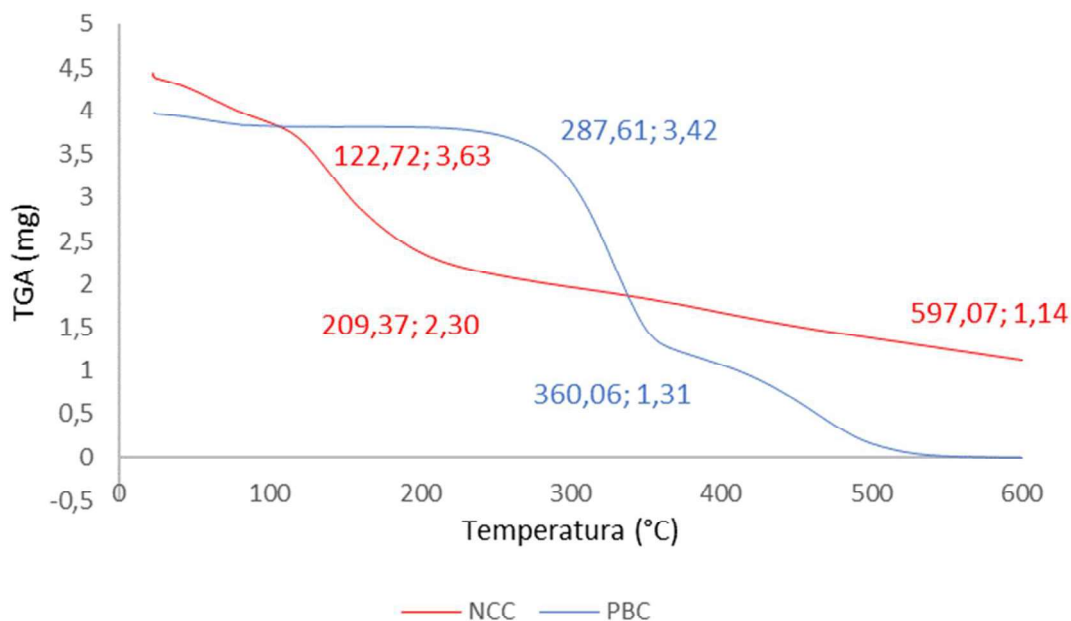
Fonte: Acervo particular dos autores (maio de 2023)

Legenda: Variação térmica diferencial para os dois tipos de amostras ao longo dos tratamentos finais executados no processo de síntese, na variação térmica até 600,00 °C

Na Figura 18, o comportamento das amostras NCC e PBC, são mostrados em relação à variação termogravimétrica. Na amostra PBC, é possível observar que em temperaturas até 287,61 °C, não ocorre perda de massa considerável na amostra, ao passo que entre esse pico é 360,06 °C, a amostra sofre redução de 3,42 para 1,31 mg, sendo um valor correspondente a 38,30% da massa restante da amostra no último pico. A partir do último pico, inicia-se o processo de decomposição da amostra final da amostra até cerca de 500 °C, a partir de onde encontram-se além desse ponto, materiais residuais da degradação. Para a amostra NCC, a alteração inicial de massa da amostra, ocorre aproximadamente até 122,72 °C, com instabilidade indicativa de processos exotérmicos que resultam na perda de massa considerável até 209,37 °C, onde se encontram apenas 2,30 mg da sua massa anterior. Deste ponto em diante, até a temperatura final de 600 °C, ocorre

decomposição da amostra de forma conservada, sem a formação de material residual.

Figura 18 – Análise de variação termogravimétrica das amostras.

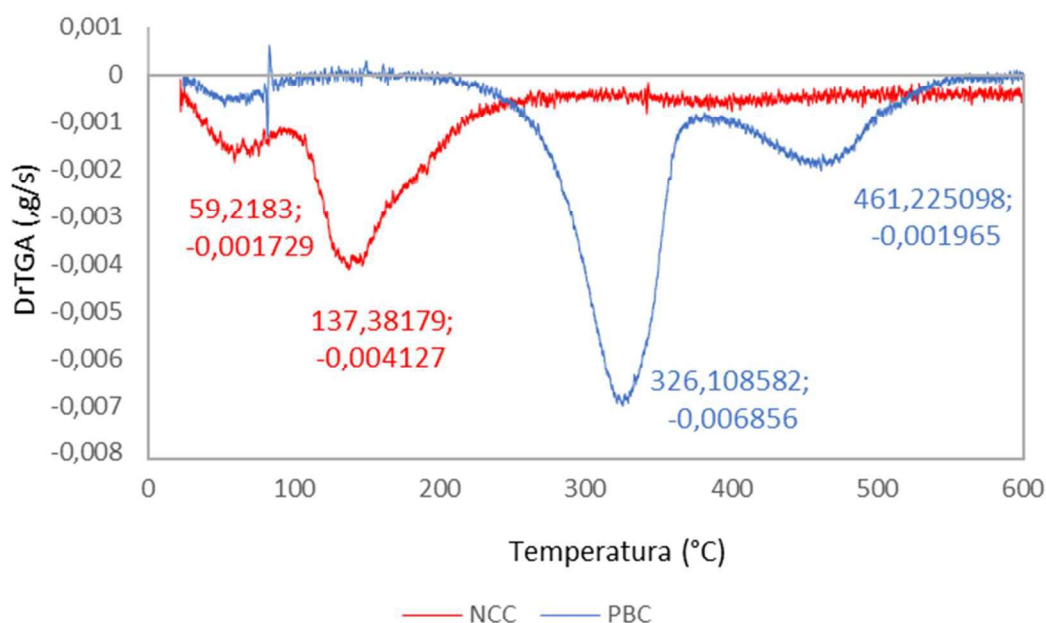


Fonte: Acervo particular dos autores (maio de 2023)

Legenda: Variação termogravimétrica para os dois tipos de amostras ao longo dos tratamentos finais executados no processo de síntese, na variação térmica até 600,00 °C

Na Figura 19, o comportamento das amostras NCC e PBC, são mostrados em relação às variações interpoladas entre análise térmica diferencial e termogravimétrica. Na amostra PBC, o pico a 326,11 °C indica a grande atividade térmica com redução significativa da massa oriunda de processos exotérmicos, que reduzem ao longo da temperatura até 461,23 °C, onde novamente a atividade térmica se reduz até o processo diferencial térmico ser finalizado em 600 °C. Na amostra NCC, o comportamento demonstra amplitude menor que a da amostra PBC, indicando maior estabilidade energética nas partículas. O pico inicial, oscilante a 59,22 °C, com máxima de 137,38 °C, mostra a redução da massa, em relação aos dados na amostra PBC, encontra-se em redução até a finalização da variação térmica em 600 °C, novamente, um indício significativo da estabilidade térmica fortemente ligado aos compostos dessa amostra, posteriormente caracterizados.

Figura 19 – Análise de interpolação entre variação térmica diferencial e termogravimétrica das amostras NCC e PBC.



Fonte: Acervo particular dos autores (maio de 2023)

Legenda: Interpolação de variação térmica diferencial e termogravimétrica para os dois tipos de amostras ao longo dos tratamentos finais executados no processo de síntese, na variação térmica até 600,00 °C

3.1.6 Caracterização de elementos e compostos constituintes

A análise qualitativa apontou, através dos picos, para a incidência dos compostos de Ródio (Rh), Vanádio (V), Cobre (Cu), Sódio (Na) e Silício (Si). A Tabela 1 traz os resultados da análise quantitativa dos compostos da amostra PBC.

Tabela 1 – Intensidade percentual de compostos encontrados na análise para a amostra PBC.

Amostra		
PBC		
Composto	Intensidade (%)	Desvio padrão
Na₂O	73,539	6,428
V₂O₅	15,078	0,668
SiO₂	7,625	0,582
CuO	3,758	0,190
CO₂	0,000	0

A Tabela 1 mostra os compostos existentes na amostra PBC, bem como suas intensidades de abundância e os desvios padrão correlatos. Em maior proporção, ocorre presença de óxido de sódio, seguido pela presença de pentóxido de vanádio. Em menor proporção, estão os dióxidos de silício e óxido de cobre, que juntos somam pouco mais de 10,30% da composição da amostra.

3.2 Discussões

Os diâmetros encontrados se relacionam com os resultados por outros autores na literatura científica. Nanofibras de algodão indicaram diâmetros de 14 a 9 nm, sendo similares aos diâmetros encontrados de NCC-C, NCC-S e NCC-L (Teixeira *et al.*, 2010). Nanocristais de celulose bacteriana demonstraram diâmetros na mesma faixa, com picos que indicavam diâmetros de 96,36 e 388,00 nm (Costa *et al.*, 2017). Dessa forma, é visível que os resultados obtidos pelas amostras NCC-C, NCC-L e NCC-S se mostram com picos equivalentes aos obtidos em trabalhos correlatos, dando indícios de uma caracterização como nanomateriais.

Quanto a cristalização das amostras, a análise DRX possibilitou através das leituras, importantes indicativos acerca das propriedades e características cristalinas das amostras. A comparação com análise de fibra de microcelulose encontrou indicativos similares, trazendo luz à interpretações paulatinamente relacionadas às regiões dos picos encontrados: os picos de todas as amostras presentes próximo a região entre $22^\circ \leq 2\theta \leq 23^\circ$, traz a indicação da presença dos cristais nas amostras, sobretudo na amostra NCC, reforçando sua caracterização e sua capacidade para interação posterior (Bilcati; Costa; Paulino, 2022). Comportamento similar acerca da presença e da predominância da região cristalina, é encontrado em sínteses de fibras de cinza da casca de arroz, em compostos silicatos, que observaram a predominância nas suas leituras, de acordo com a abrangência da intensidade na região $20^\circ \leq 2\theta \leq 25^\circ$ (Moura; Resende; Souza, 2023). Além disso, os picos encontrados também podem ser observados de forma semelhante aos obtidos durante a leitura de amostras de nanocelulose esférica bacteriana ($14,4^\circ$ e $22,7^\circ$), onde as formações cristalinas apontam para regiões convergentes dos picos indicados (Cesca *et al.*, 2020).

A inclusão das fibras de celulose, em escala nano ou micro, para compósitos a base de cimento, demonstram implicação de uso para as propriedades mecânicas e físicas, para tal, a determinação dos teores é essencialmente vinculada à

perspectiva desejada (Morais, 2021; Bilcati, Costa, Paulino, 2022; Lima *et al.*, 2022; Machado *et al.*, 2022). Os teores encontrados para celulose, hemicelulose e lignina consequentemente refletidos pelos teores de FDN e FDA, se encontraram acima dos obtidos por outras espécies, como a fibra de batata e a fibra de batata-doce, pinho, eucalipto e murumuru (Lima *et al.*, 2022; Machado *et al.*, 2022). No entanto, espécies com valores semelhantes, como o bambu *Guadua spp.*, em forma de nanofibra, e o composto de murumuru, através de microfibras de celulose, apresentaram desempenhos mecânicos de acréscimo nas propriedades e comportamento de integração entre componentes do cimento e da celulose, o que indica a perspectiva de aplicação (Morais, 2021; Bilcati, Costa, Paulino, 2022; Lima *et al.*, 2022).

Para a análise térmica diferencial e termogravimétrica, os comportamentos demonstraram situações em que foi possível estabelecer parâmetros que enquadram as amostras verificadas quanto a sua utilização para o compósito cimentício. Argilas pozolânicas, materiais com composições e estruturas diferentes das analisadas nas amostras presentes, apesar dos picos endotérmicos, foram passíveis de observação nelas, processos semelhantes de perda de massa e conservação residual (Medeiros; Moraes, 2020). Polpas celulósicas de bambu *Guadua spp.* obtiveram comportamento semelhante ao obtido para a amostra PBC, possivelmente, pela relação entre as espécies analisadas e de referência do estudo, com pontos exotérmicos e resíduos oriundos da decomposição (Morais, 2021). Em um paralelo constituído por análises térmicas pautados em compostos de celulose, os nanocristais de celulose bacteriana e géis de acetato de celulose, pontos em comum indicaram que os picos presentes nas curvas de referência e na obtida do estudo, convergem ao passo de que três processos ocorrem ao longo da variação térmica: a perda de massa inicial, ligada à perda de água intrínseca às moléculas da amostra; o segundo processo é de despolimerização, resultado da quebra de ligações sofridas pela degradação da celulose, o último pico consequente pela última faixa de análise, reflete a degradação dos resíduos carbonáceos da amostra (Senna; Menezes; Botaro, 2013; Costa *et al.*, 2017).

A análise FTIR mostrou os resultados obtidos de teor de celulose, lignina e hemicelulose. Os grupos de C, H e O, bem como suas diferentes ligações encontradas, demonstram essa relação. Outros estudos com celulose obtida de madeira da espécie *Corymbia citriodora* e de hidrogéis com base de acetato de celulose, encontraram variações nos picos, tendendo a uma proximidade média de $\pm 100 \text{ cm}^{-1}$, apontando vertentes semelhantes na indicação dos comportamentos

dos compostos das amostras, sendo delas, com resultados mais expressivos nas amostras de NCC (Botaro; Santos; Oliveira, 2009; Dias Júnior *et al.*, 2019).

A análise EDX apontou riquezas de compostos de óxido de sódio, pentóxido de vanádio e dióxido de silício na amostra PBC. Os resultados corroboram outras análises que indicam a eficiência dessa técnica para verificação de óxidos e metais, como o zinco e semimetais, em estudos analisando camadas de cobre (Nyong *et al.*, 2021). As concentrações de óxido de sódio e o teor de mais baixo de dióxido de silício se assemelha ao de outras substâncias estudadas, como resíduos oleosos, que possuem potencial para incorporação no concreto, devido as concentrações do composto de sódio ser similar ao do concreto, indicando afinidade, e o teor do composto de silício em quantidade não elevada, ao ponto de desencadear reações de álcalis-agregado, que possam comprometer a durabilidade e a resistência do concreto a longo prazo (Lira *et al.*, 2015).

A perspectiva de aplicação de nanocompósitos de celulose, envolvem desafios de sua síntese, ao passo que as aplicações incluem uma gama de variações desde estruturais, até de consumo alimentar (Dongre; Suryawashi, 2021; Hasan; Walia, 2021; Ahmad *et al.*, 2022). Ao passo de a utilização como componente estrutural, permeie o preparo e síntese, se assemelhando a trabalhos que executam hidrólise ácida, ainda que com particularidades afins aos métodos, que refletem, resultados similares aos encontrados no presente estudo (Yu *et al.*, 2012; Abdulkhani *et al.*, 2014; Orrabalis *et al.*, 2019; Thipcai *et al.*, 2023). Por sua vez, a caracterização através das análises como FTIR e TGA/DTG, refletiu a similaridades com compostos de nanocristais obtidos por outras espécies sintetizadas em métodos alternativos aos aqui proferidos ao longo das etapas realizadas (Yu *et al.*, 2012; Abdulkhani *et al.*, 2014; Guo; Wu; Xie, 2017; Orrabalis *et al.*, 2019; Thipcai *et al.*, 2023). Portanto, é notório que a execução dos processos estabeleceu consistência a estudos consagrados na literatura científica atual.

4 CONCLUSÕES

As análises obtidas trazem indícios de que a nanofibra e o nanocristal obtidos da celulose do bambu nativo *Guadua weberbaueri* foram obtidos e caracterizados de maneira satisfatória. As análises apontaram que são nanomateriais com predominância cristalina, possuem altos índices de celulose e baixos índices de lignina e hemicelulose, possuem ligações compatíveis com compostos carbonáceos similares, são ricos em óxidos de sódio e possuem presença de sílicas, possuindo afinidade química com os compostos presentes no cimento, indicando ser propício para incorporação no compósito cimentício. A análise térmica indicou alta estabilidade e alta temperatura de degradação. O presente estudo mostrou que existem indícios propícios para a incorporação no compósito cimentício, corroborando valores de sustentabilidade e nanotecnologia podem ser aplicados na construção civil.

AGRADECIMENTOS

À CAPES; à Maria Rosália Nascimento; à Ambiental Amazônia, na pessoa de Emanuel Amaral; à FUNTAC; ao Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos, na pessoa da professora Ana Cristina e à EMBRAPA.

REFERÊNCIAS

- ABDULKHANI, A.; HOSSEINZADEH, J.; ASHORI, A.; DADASHI, S.; TAKZARE, Z. Preparation and characterization of modified cellulose nanofibers reinforced polylactic acid nanocomposite. **Polymer Testing**, 35, 73–79. 2014.
- AHMAD, M. I.; FAROOQ, S.; ZHANG, H. Recent advances in the fabrication, health benefits, and food applications of bamboo cellulose. **Food Hydrocolloids for Health**, 2, 100103. 2022.
- ALVARENGA, B. L.; JUNIOR, L. M.; FARIA, D. L.; DIAS, M. C.; ALVARENGA, V. L., MENDES, L. M.; JUNIOR, J. B. G. Avaliação física e mecânica de compósitos de gesso reforçados com fibra de Bambusa tuldoidea. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, p. e13187, 2022.
- AUERSVALDT, B. L.; LAY, L. A.; MIRANDA, T. L. Incorporação de fibras vegetais de bambu ao concreto em substituição à fibras sintéticas. In: **Anais IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, 2019.
- BARBOSA, A. DE M.; REBELO, V. S. M., MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M.. Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e12435, 2019.

BILCATI, G. K.; COSTA, M. DO R. DE M. M. DA .; PAULINO, R. S.. Efeito do reforço multi-escala fibra de celulose-microcelulose cristalina na fase de hidratação de pastas de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 4, p. e20220220, 2022.

BOTARO, V. R.; SANTOS, C. G.; OLIVEIRA, V. A.. Hidrogéis superabsorventes a base de acetato de celulose modificado por dianidrido 3,3', 4,4' benzofenona tetracarboxílico (BTDA): síntese, caracterização e estudos físico-químicos de absorção. **Polímeros**, v. 19, n. 4, p. 278–284, 2009.

BRITO, F. M. S.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C.; NETO, H. F. Caracterização anatômica e física do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). **Floresta e Ambiente**; 22(4), p.559-566, 2015.

CAMPOS, C. I.; SILVA, A. P. S.; AQUINO, V. B. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Análise do efeito da incorporação de nanopartículas de ZnO nas propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 1, p. 171–182, jan. 2023.

CESCA, K.; NETTO, M. S.; ELY, V. L.; DOTTO, G. L.; FOLETTO, E. L.; HOTZA, D. Synthesis of spherical bacterial nanocellulose as a potential silver adsorption agent for antimicrobial purposes. **Cellulose Chem. Technol.**, 54 (3-4), 285-290, 2020.

CORREIA, V. C. **Produção e caracterização de polpa organossolve de bambu para reforço de matrizes cimentícias**. Dissertação (Zootecnia). Universidade de São Paulo, Pirassuninga - SP, 2011.

COSTA, J. F.; GARCIA, M. C. F.; APATI, G. P.; BARUD, H. S.; SCHNEIDER, A. L. S.; PEZZIN, A. P. T. Nanocristais de celulose bacteriana: da obtenção, sob diferentes condições de hidrólise, à incorporação como reforço em poli(L-ácido láctico). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.

DIAS JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, R. N.; DEGLISE, X.; SOUZA, N. D.; BRITO, J. O. Infrared spectroscopy analysis on charcoal generated by the pyrolysis of *Corymbia. citriodora* wood. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e12387, 2019.

DONGRE, M.; SURYAWASHI, V. B. Analysis of cellulose based nanocomposites & potential applications. **Materials Today: Proceedings** 45, 3476–3482. 2021.

GOETZ, N. M.; KUNST, S. R.; MORISSO, F. D. P.; OLIVEIRA, C. T.; MACHADO, T. C. Estudo da eficiência do uso de bambu como bioadsorvente na remoção de azul de metileno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 3, p. e20220065, 2022.

GUO, X.; WU, Y.; XIE, X. Water vapor sorption properties of cellulose nanocrystals and nanofibers using dynamic vapor sorption apparatus. **Scientific Reports**, 7, 14207, DOI:10.1038/s41598-017-14664-7. 2017.

HASAN, I.; WALIA, S. A review on properties and challenges associated with cellulose nanocrystals and nanocomposites. **Materials Today: Proceedings** 45, 3365–3369. 2021.

JESUS, L. C. C.; LUZ, S. M.; LEÃO, R. M.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e12421, 2019.

- LIMA, W. A. S.; SOUZA, A. C. A.; BRABO, D. R.; JUNIOR, J. L. L.; DIAS, C. G. B. T. Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico a partir do endocarpo de murumuru (*Astrocaryum murumuru* Mart.) e poliolefinas recicladas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 4, p. e20220160, 2022.
- LIRA, Y. C.; MENDONÇA, A. M. G. D.; ALVES, M. H. N.; COSTA, D. B.; FILHO, M. B. C. Análise do equivalente alcalino de resíduo oleoso da indústria de E & P de petróleo e cimento Portland para utilização em concreto. In: **Anais I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2015.
- MACHADO, B. A. S.; REIS, J. H. O.; SILVA, J. B. S.; CRUZ, L. S.; NUNES, I. L.; PEREIRA, F. V.; DRUZIAN, J. I. Obtenção de nanocelulose da fibra de coco verde e incorporação em filmes biodegradáveis de amido plastificados com glicerol. **Quim. Nova**, v. 37, n. 8, p.1275-1282, 2014.
- MACHADO, M. C.; CORRÊA, M. N.; KOZLOSKI, G. V.; OLIVEIRA, L.; BRAUNER, C. C.; BARBOSA, A. A.; CARDOSO, K. B.; PINO, F. A. B. Sweet potato (*Ipomea batatas*) feed affects intake, digestibility and nitrogen retention of ovine fed with ryegrass hay (*Lolium multiflorum* Lam. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v.74, n.1, p.169-175, 2022.
- MEDEIROS, J. L. G.; MORAIS, C. R. S. Aplicação de técnicas termoanalíticas (TGA/DTA) para avaliação do comportamento térmico de amostras de argilas para obtenção de pozolanas. **Divulgação científica e tecnológica do IFPB**. n. 50. 2020.
- MENDES, A. R.; VANDERLEI, R. D.; BASSO, M. A. Análise do processo de dispersão da nanocelulose cristalina para a produção de compósitos cimentícios. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 1, p. 183–196, jan. 2023.
- MIRANDA, E. H. DE N.; SILVA, G.A.; GOMES, D.A.C.; SILVEIRA, M. N. L.; VITORINO, F. C.; FERREIRA, S. F. Efeito de diferentes espécies de madeira e bambu na hidratação de matrizes à base de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 4, p. e20220194, 2022.
- MORAIS, C. D. N. **Produção e utilização de nanofibras celulósicas de taboca (*Guadua spp*) para reforço de compósitos cimentícios**. Dissertação (Ciência, Inovação e Tecnologia). Universidade Federal do Acre, Rio Branco – AC, 2021.
- MOURA, C. A. M. DE .; RESENDE, J. A. L. C.; SOUZA, K. C. DE .. Caracterização de pastas de cimento Portland com adição de sílica visando a imobilização de Cr(VI). **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, p. 245–261, jul. 2023.
- NUNES, M. R. S.; RAMOS, D. P.; MORAIS, C. D. N.; SENA, A. E. C.; RAMOS, A. L. R.; RODRIGUEZ, F. R.; FARIA, F. S. E. D. V. Preparação e caracterização de polpa celulósica de bambu *Guadua weberbaueri*: tecnologia. **SAJEBTT**, Rio Branco, UFAC, v.8, n.2, p.217-232, 2021.
- NYONG, A. E.; UDOH, G.; JOACHIM, J. A. A.; NSI, E. W.; ROHATGI, P. K. Study of the morphological Changes and the Growth Kinetics of the Oxides Formed by the High Temperature Oxidation of Cu-32.02% Zn-2.30% Pb Brass. **Materials Research**. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0173>. 25:e20210173. 2022.

ORRABALIS, C.; PAMPILO, L. G.; CALDERÓN-LONDOÑO, C.; TRINIDAD, M.; GARCÍA, R. M. Characterization of Nanocellulose Obtained from *Cereus Forbesii* (a South American cactus). **Materials Research**; 22(6): e20190243, 2019.

PEGO, M. F. F.; BIANCHI, M. L.; VEIGA, T. R. L. A. Avaliação das propriedades do bagaço de cana e bambu para produção de celulose e papel. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 62, 2019.

PEREIRA, A. L. S.; CORDEIRO, E. M. S.; NASCIMENTO, D. M.; MORAIS, J. P. S.; SOUSA, M. S. M.; ROSA, M. F. Extração e caracterização de nanocelulose de fibras do pseudocaule da bananeira. In: **Anais V Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação**, 2014.

PEREIRA, M. A. R. **Projeto bambu: introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações**. Tese (Design e Construção com Bambu). Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru - SP, 2012.

PESCAROLO, A.; SILVA, S. H. L.; PINTO, M. C. C.; COSTA, M. R. M. M. A influência de microfibras de celulose no estado fresco de argamassas. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 1, p. 179–190, out. 2022.

RAMBO, M. K. D.; RAMBO, M. C. D.; ALMEIDA, K. J. C. R.; ALEXANDRE, G. P. Estudo de Análise Termogravimétrica de Diferentes Biomassas Lignocelulósicas Utilizando a Análise por Componentes Principais. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 862–868, 2015. DOI: 10.5902/2179460X18332. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/18332>. Acesso em: 27 jul. 2023.

RIBEIRO, F. W. M. **Produção de biocompósitos a partir de matriz polibenzoxazínica derivada do LCC reforçada com fibras de bambu**. Dissertação (Química Orgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2016.

RODRIGUES, S. D. DE S.; SOUSA, J. G. G. DE .; OLIVIER, N. C.. Efeitos do envelhecimento acelerado sobre o gesso beta com a adição de hidrorrepelente de massa. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 355–369, out. 2022.

ROSA, M.F.; MEDEIROS, E.S.; MALMONGE, J.A.; GREGORSKI, K.S.; WOOD, D.F.; MATTOSO, L.H.C.; GLENN, G.; ORTSB, W.J.; IMAM, S.H. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, p. 831-92, 2010.

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

SASAMORI, A. M.; PIRES, P. G. P.; LEMOS, A. L. de; SANTANA, R. M. C. Influence of lignin type on the characterization of natural fiber polymer composites. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 44, p. e14, 2022. DOI: 10.5902/2179460X68827. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/68827>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SENNA, A. M.; MENEZES, A. J. DE .; BOTARO, V. R.. Estudo da densidade de ligações Cruzadas em géis superabsorventes obtidos do acetato de celulose. **Polímeros**, v. 23, n. 1, p. 59–64, 2013.

SILVESTRO, L.; RUVIARO, A. S.; LIMA, G. T. S.; MATOS, P. R.; RODRIGUEZ, E.; GLEIZE, P. J. P. Sonicating polycarboxylate-based superplasticizer for application in cementitious matrix. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 2, p. e16205, 2023.

TEIXEIRA, E. DE M.; OLVEIRA, C. R.; MATTOSO, L. H. C.; CORRÊA, A. C.; PALADIN, P. D. Nanofibras de algodão obtidas sob diferentes condições de hidrólise ácida. **Polímeros**, v. 20, n. 4, p. 264–268, 2010.

THIPCHAI, P.; PUNYODOM, W.; JANTANASAKULWONG, K.; THANAKKASARANEE, S.; HINMO, S.; PRATINTHONG, K.; KASI, G.; RACHTANAPUN, P. Preparation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Bamboos and Their Application in Cassava Starch-Based Film. **Polymers** 15, 2622. <https://doi.org/10.3390/polym15122622>. 2023.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysacchrides in relation to animal nutrition. **Jounal Dairy Scientific**, v. 74, p.3583-3597, 1991.

YU, M.; YANG, R.; HUANG, L.; CAO, X.; YANG, F.; LIU, D. Preparation and Characterization of Bamboo Nanocrystalline Cellulose. **BioResources** 7(2), 1802-1812. 2012.

CAPÍTULO III

INCORPORAÇÃO DE NANOFIBRAS E NANOCRISTAIS DE CELULOSE DO BAMBU NATIVO (*Guadua weberbaueri*) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO

REVISTA: AMBIENTE CONSTRUÍDO (ISSN 1678-8621)

CLASSIFICAÇÃO QUALIS/CAPES (2017-2020): A3

INCORPORAÇÃO DE NANOFIBRAS E NANOCRISTAIS DE CELULOSE DO BAMBU NATIVO (*Guadua weberbaueri*) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO

RESUMO

Neste trabalho foram utilizadas nanofibras e nanocristais de celulose, oriundos do bambu nativo amazônico *Guadua weberbaueri*, em compósitos cimentícios estruturais. Através de etapas de preparação de nanofibras de bambu (PBC) e nanocristais de celulose (NCC), bem como obtenção de bambu triturado (BT) e fibras deslignificadas (PDC), as amostras correspondentes ao nanomateriais aditivados foram caracterizadas com ensaios físicos como absorção de água, massa específica, índice de vazios e variação dimensional. Foi realizado ensaio mecânico de resistência à tração, através de 20 corpos de prova, rompidos aos 28 dias, com teor de incorporação de 0,40% de massa em relação ao cimento, amparados pelas normativas correspondentes ABNT NBR 7215, 7222 e 9778, além de ter sido realizado tratamento estatístico pelo método de análise de variâncias (ANOVA). Os resultados indicaram, em relação ao controle, a melhoria das propriedades físicas, principalmente nas composições com nanofibras e nanocristais de celulose, simultaneamente, para os ensaios de resistência mecânica de tração, o indicativo permitiu observar otimização da 14,60% com adição de nanofibras e 12,70% na adição de nanocristais. Portanto, com a execução realizada, foi possível notar que a incorporação conseguiu gerar otimização a partir da performance conjunta dos materiais em análise, reforçando as práticas e ideais advindas da engenharia civil, nanotecnologia e sustentabilidade.

Palavras-chave: desempenho estrutural, fibras vegetais, nanotecnologia, Amazônia.

ABSTRACT

In this work, nanofibers and cellulose nanocrystals from the native Amazonian bamboo *Guadua weberbaueri* were used in structural cementitious composites. Through the preparation of bamboo nanofibers (PBC) and cellulose nanocrystals (NCC), as well as obtaining crushed bamboo (BT) and delignified fibers (PDC), the samples corresponding to the additive nanomaterials were characterized with physical tests such as water absorption, specific mass, void index and dimensional variation. A mechanical tensile strength test was carried out through 20 specimens, broken at 28 days, with an incorporation content of 0.40% of mass in relation to cement, supported by the corresponding standards ABNT NBR 7215, 7222 and 9778, in addition to statistical treatment by the analysis of variances method (ANOVA). The results indicated, in relation to the control, the improvement of the physical properties, especially in the compositions with nanofibers and cellulose nanocrystals, simultaneously, for the mechanical tensile strength tests, the indicative allowed to observe an optimization of 14.60% with the addition of nanofibers and 12.70% in the addition of nanocrystals. Therefore, with the execution carried out, it was possible to notice that the incorporation was able to generate optimization from the joint performance of the materials under analysis, reinforcing the practices and ideals arising from civil engineering, nanotechnology and sustainability.

Keywords: structural performance, plant fibers, nanotechnology, Amazônia.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fibras vegetais contempla desde alimentação, artesanato, movelaria, a construção civil, sendo nesta última, voltada a aplicação estrutural e de revestimento (Nunes *et al.*, 2021). Nas aplicações estruturais, destacam-se os aditivos para argamassa ou concreto, a base de fibras, para incremento de resistência; nesse aspecto, tendo uma maior representação crescente nos últimos anos, estão as fibras vegetais. Fibras de juta (*Corchorus capsularis*) e malva (*Urena lobata* L.) combinados com metacaulinita têm resultado em compósitos, materiais mistos originando otimização dos materiais matriz, com otimização no desempenho de resistência à flexão (Oliveira; Melo-Filho, 2024).

A síntese das fibras pode ter uma variedade de origens quando se tratam de fibras vegetais, podendo estas serem extraídas de raízes, caule, folhas, dentre outras (Pereira *et al.*, 2021). Da folha de buriti, em matriz de base epóxi, se originaram compósitos trabalhados em teores de baixo peso específico, que mostraram baixa relação peso-volume, propícias ao uso estrutural, aumentando também as resistências características à compressão (Pereira *et al.*, 2021).

Também é importante notar que quando se trabalham as fibras vegetais, a composição de materiais variados, com características afins, tende a produzir resultados convergentes (Nascimento *et al.*, 2023). Fibras de curauá, sisal e microfibras de polipropileno, combinadas em proporções diferentes obtiveram comportamentos igualmente variados: argamassas enriquecidas com fibras de sisal têm pico na resistência mecânica, ao passo que as enriquecidas com microfibras de polipropileno desempenham a performance otimizada nas propriedades físicas dos materiais (Nascimento *et al.*, 2023).

Paralelamente, o desenvolvimento das fibras vegetais, vem sendo aprimorado quando comparado a fibras sintéticas (Barraza *et al.*, 2023). Estudos experimentais comparativos, com fibras vegetais (de açaí e abacaxi), em relação a fibras sintéticas (de vidro e de poliéster), mostraram resultados superiores por parte das sintéticas, evidenciando uma certa margem de melhoria a serem desenvolvidas, essencialmente, na fibra curta de açaí, que obteve melhor desempenho dentre as vegetais (Barraza *et al.*, 2023).

Assim, é notório que a utilização de fibras naturais está em crescimento, de forma a emergir como uma opção viável quando se desenvolvem novos materiais, essencialmente os compostos (Barros *et al.*, 2023). Assim, é possível notar que as práticas sustentáveis vêm se alinhando com vantagens técnicas, para utilização estrutural, considerando também fatores tecnológicos (produtos de pesquisa), sociais (desenvolvimento de economias locais) e ambientais (utilização de abundâncias regionais vegetais) (Barros *et al.*, 2023).

Simultaneamente ao crescimento dos compósitos com fibras, está a ascensão, na escala industrial, dos nanoproductos (Gamonal; Iturralde, 2024). A nanotecnologia, área base de aplicações interdisciplinares, trabalha nas escalas de desenvolvimento e propriedades nanométricas, tendo em sua unidade fundamental, o nanômetro, $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$, e responde por alterações no desempenho de materiais diversos, em razão de suas ligações oriundas a uma maior superfície de contato (Gamonal; Iturralde, 2024). Assim, nos últimos anos, a indústria tem testemunhado a revolução dos nanoproductos, sejam nanocompósitos ou nanorevestimentos, as aplicações têm transcendido áreas como odontologia, medicina veterinária, engenharia civil, dentre outros; que reiteram seu caráter e, essencialmente na engenharia civil, possibilitam a otimização de materiais e técnicas existentes (Gamonal; Iturralde, 2024).

A nanotecnologia, aplicada à construção civil, permitiu otimizar os desempenhos de resistência, a partir da adição de nanoproductos (Lopes *et al.*, 2022). O concreto com nanotubos de carbono e fibras permitiu diminuir índices de absorção de água, tornar estável a mobilidade de misturas e sua trabalhabilidade, bem como a resistência à compressão axial e à flexão dos obtidos, sinalizando as transformações que ocorrem a nível de nanoestrutura nos compósitos desenvolvidos (Lopes *et al.*, 2022).

Também é possível notar que, da interação entre nanotecnologia, engenharia civil e fibras vegetais, existe uma perspectiva única e crescente, responsável por alavancar todas essas áreas, juntas (Czovny *et al.*, 2024). Compósitos com nanofibras de celulose, obtidas da polpa de *Eucalyptus sp.* demonstraram, através de análises e ensaios, perfeita incorporação entre a matriz cimentícia e as nanofibras, possibilitando integração e desempenho otimizado conjunto, o que elevou as propriedades mecânica de resistência e diminuiu os índices físicos, como peso específico e índices de vazios (Czovny *et al.*, 2024).

No presente estudo foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas do compósito cimentício com incorporação de nanofibras e nanocristais de celulose, obtidos do bambu nativo amazônico *Guadua weberbaueri*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Síntese de nanofibras e nanocristais

Foram obtidas as nanofibras e nanocristais, bem como suas caracterizações químicas e térmicas, seguindo a metodologia de Viana *et al.* (2024). A seguir são expressos os principais aspectos de cada etapa de preparo de amostra (Tabela 1).

Tabela 1: Processo de síntese das amostras.

Amostra (sigla)	Processo de preparo	Reagente principal	Substrato
Bambu triturado (BT)	Trituração	-	-
Polpa deslignificada de celulose (PDC)	Deslignificação	Hidróxido de sódio 99%	BT
Polpa branqueada de celulose (PBC)	Branqueamento	Peróxido de hidrogênio 30% e hidróxido de sódio 99%	PDC
Nanocristais de celulose (NCC)	Hidrólise ácida	Ácido sulfúrico 99%	PBC

2.2 Preparo de argamassa

O preparo da argamassa seguiu o exposto na ABNT NBR 7215 (2019), com adaptações segundo a ABNT NBT 12655 (2022) em relação ao teor de água. O teor de incorporação de cada amostra, de 0,40% em relação à massa de cimento, ocorreu segundo Moraes (2021). A Tabela 2 expõe as quantidades de cada insumo utilizado.

Tabela 2: Proporção de insumos utilizados.

Insumo	Quantidade				
	Traço BT	Traço PDC	Traço PBC	Traço NCC	Controle
Cimento	624 g	624 g	624 g	624 g	624 g
Areia fração fina	1,872 kg	1,872 kg	1,872 kg	1,872 kg	1,872 kg
Água	350 g	350 g	350 g	350 g	350 g
BT	2,50 g	-	-	-	-
PDC	-	2,50 g	-	-	-
PBC	-	-	2,50 g	-	-
NCC	-	-	-	2,50 g	-

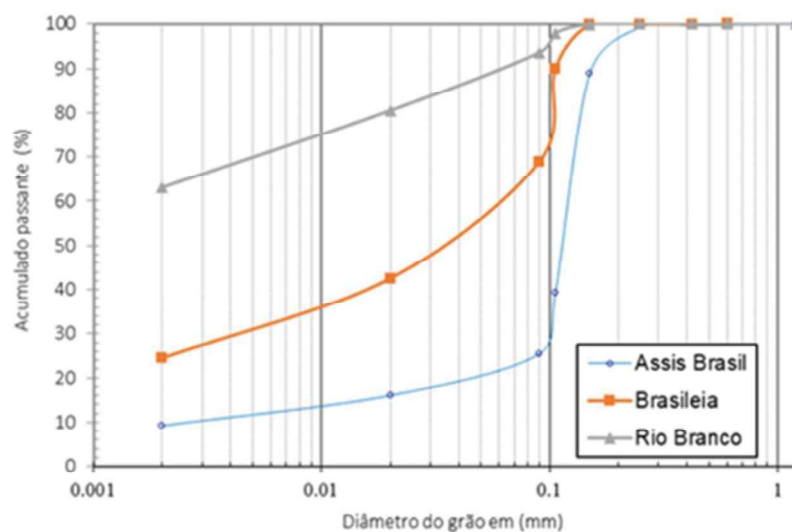
O cimento utilizado foi da marca Itaú, do tipo Cimento Portland IV-32 (caracterizações na Tabela 3). A areia utilização foi a fração fina de areia do Rio Acre (granulometria expressa na Figura 1).

Tabela 3: Composição do Cimento Portland utilizado.

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

Fonte: Votorantim (2024) adaptado.

Figura 1: Curva granulométrica da areia do Rio Acre utilizada.



Fonte: Lucio *et al.* (2024).

Foram preparados cinco traços para dosagem dos corpos de prova (CPs), um para cada amostra e um traço de controle, sem adição de amostras. As Figuras 2 a 4 expõem os preparos dos CPs de cada amostra.

Figura 2: (A) preparo de CP de amostras controle (C); (B) preparo de CP com amostra BT

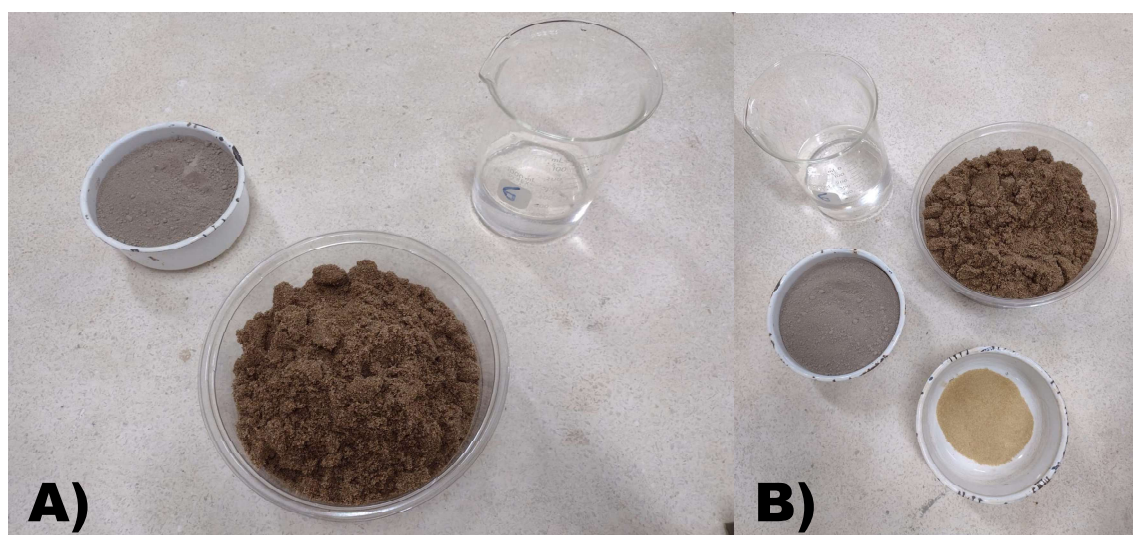


Figura 3: (A) preparo de CP com amostra PBC; (B) preparo de CP com amostra PDC.

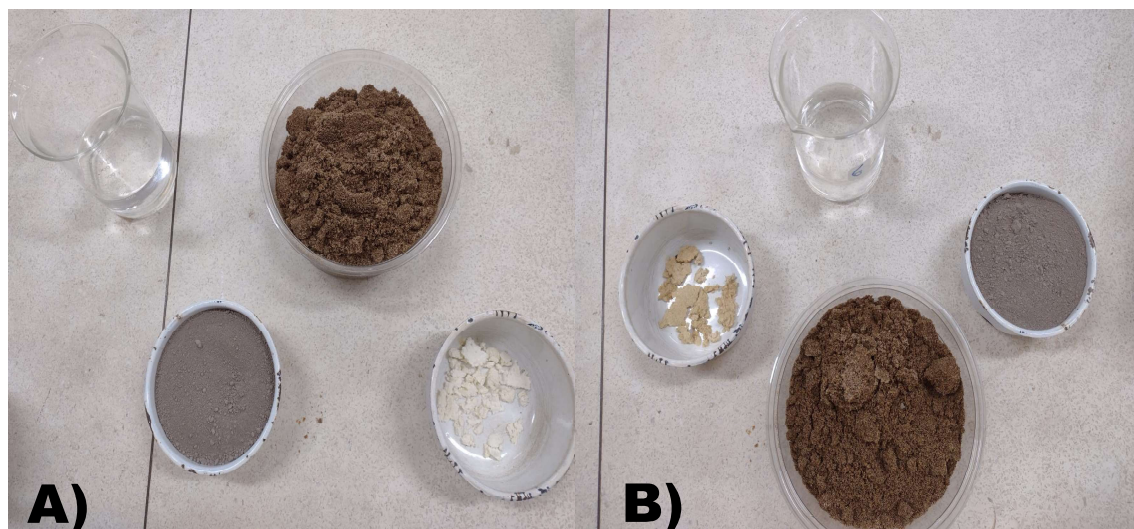
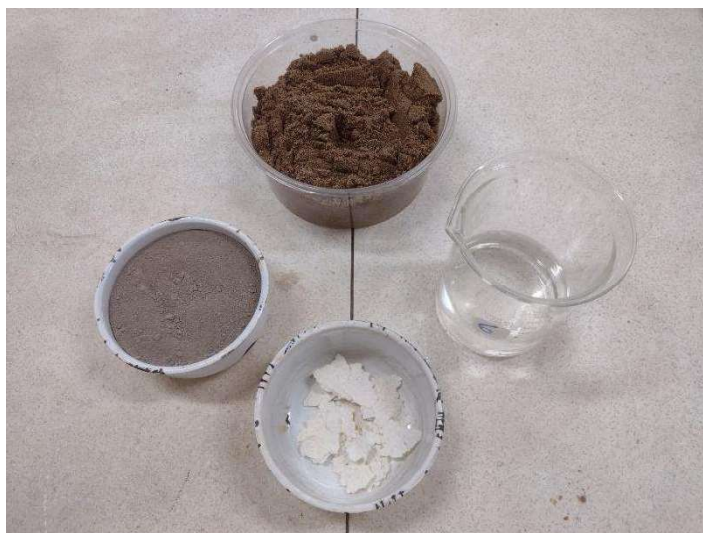


Figura 4: Preparo de CP com amostra NCC.

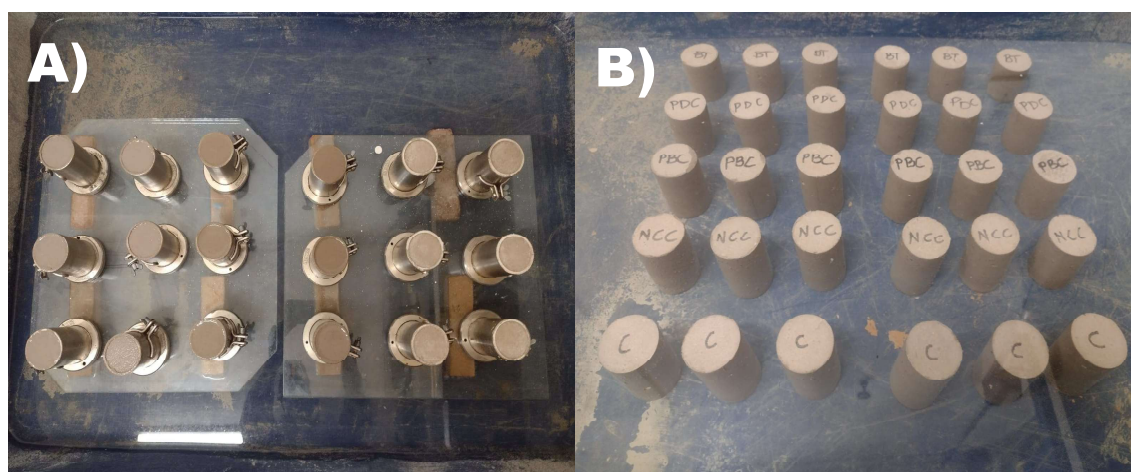


O processo de mistura dos insumos seguiu o exposto na ABNT NBR 7215 (2019), com adaptações. Para a mistura, foi utilizada misturadora de argamassa da marca PAVITEST. Houve a mistura dos insumos secos, com água, em velocidade baixa, durante 30 s. Em seguida, durante 90 s, o equipamento foi desligado, e nos

primeiros 30 s, ocorreu a limpeza das paredes e pá do recipiente, com espátula. Nos 60 s finais, a mistura permaneceu em repouso. Por fim, a mistura foi levada à velocidade alta durante 60 s.

Os CPs foram moldados em fôrmas cilíndricas 50 mm x 100 mm, untadas previamente com óleo vegetal. A argamassa foi alocada em quatro camadas adensadas com 30 golpes em cada, aproximadamente, utilizando soquete manual. Os CPs permaneceram em fôrma durante 24 h iniciais, e após desforma, foram levados ao tanque e imersos. A Figura 5 mostra os CPs durante execução em fôrma e em desforma, no tanque d'água.

Figura 5: (A) CP em cura inicial; (B) CPs imersos em tanque.



2.3 Ensaios físicos

Foram caracterizadas as propriedades de absorção de água, massa específica, índice de vazios e variação dimensional, utilizando as normas ABNT NBR 9778 (2009).

Na execução do ensaio, os CPs moldados foram levados a estufa, da marca DELEO, onde permaneceram durante 4 dias, à temperatura de 105 °C (Figura 6-A). Após esse prazo, tiveram sua massa aferida: massa seca (M_s) e suas dimensões de comprimento e diâmetro, secos, aferidos através de VDs, com e VDs, dia, respectivamente. Em seguida, foram imersos em água durante 72 h. Ao fim do período, os CPs foram condicionados a recipientes onde, completamente submersos em água a nível constante, foram levados a ebulição por 2 h (Figura 6-B). Finalizando o ensaio,

foram aferidas as massas imersas (M_i), através de balança hidrostática (Figura 7), a massa saturada ao ar (M_{sat}) e também suas dimensões saturadas de comprimento e diâmetro $VD_{sat,com}$ e $VD_{sat,dia}$.

Figura 6: (A) CPs em processo de secagem em estufa; (B) CPs imersos em água a nível constante, em ebulição.



Figura 7: Balança hidrostática para realização de medição de massa imersa.



As equações (1), (2), (3) e (4) trazem as formas de cálculos dos índices de absorção de água, índice de vazios, massa específica e variação dimensional, conforme a norma ABNT NBR 9778 (2009).

$$A (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (1)$$

$$I_v (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} * 100 \quad (2)$$

$$\rho = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (3)$$

$$VD (\%) = \frac{VD_{sat} - VD_s}{VD_s} * 100 \quad (4)$$

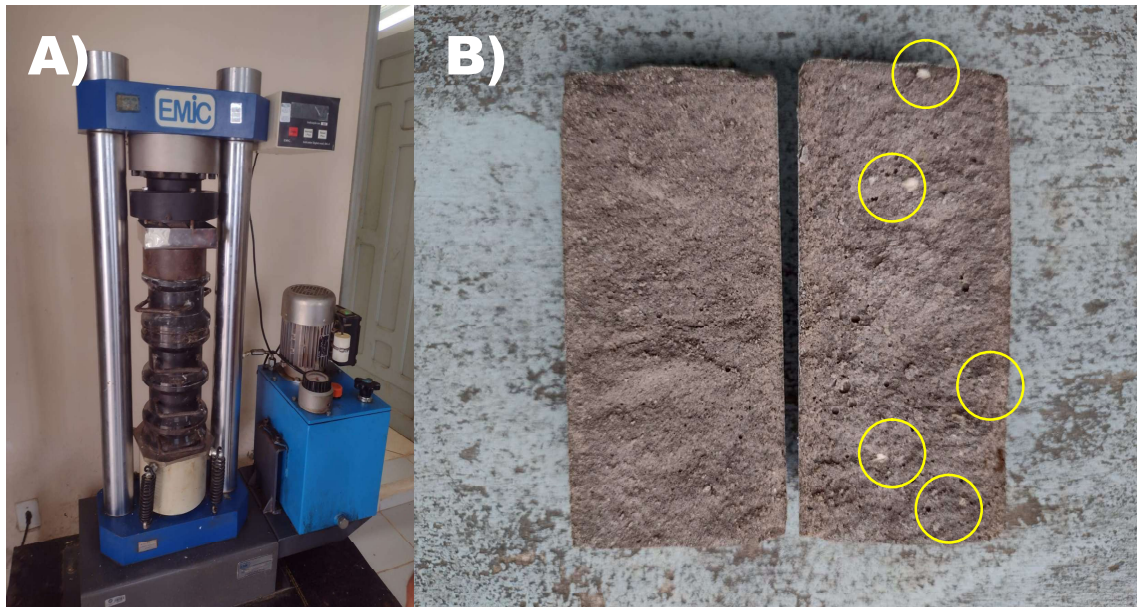
Sendo:

A = absorção de água; I_v = índice de vazios; ρ = massa específica; VD = variação dimensional; M_s = massa seca; $VD_{s,com}$ e $VD_{s,dia}$ = dimensões de comprimento e diâmetro, secos; M_i = massas imersas; M_{sat} = a massa saturada ao ar.

2.4 Ensaios mecânicos

Para os ensaios mecânicos, foi utilizada a norma ABNT NBR 7222 (2011) para execução de ensaio de compressão diametral para obtenção da resistência à tração. A prensa é da marca EMIC e possui taxa de aplicação de carga de 0,1 kN/min. A Figura 8 mostra a prensa em processo de ruptura (Figura 8-A) e os CPs rompidos (Figura 8-B).

Figura 8: (A) Prensa para ruptura de CPs, a compressão diametral, adaptada com suporte de apoio; (B) CPs rompidos, à esquerda, amostra controle, à direita, CP com amostra NCC (destaque).



Os dados relacionados a força de ruptura na compressão diametral, coletados na prensa, foram tabulados e calculados, para obtenção da resistência a tração, calculada através da equação (5), fornecida pela norma ABNT NBR 7222 (2011).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F}{\pi * d * l} \quad (5)$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$ = resistência a tração por compressão diametral, em MPa; F = força máxima obtida no ensaio, em N; d = diâmetro nominal do CP, em mm; l = comprimento nominal do CP, em mm.

2.5 Análise estatística

Para o delineamento amostral que satisfaça as condições para análise estatística, foram utilizados:

- i. Ensaios físicos: 5 amostras, 2 CPs, 2 repetições nos aferimentos de cada propriedade, totalizando amostra N=20, atendendo os dispostos para

análise estatística (Guedes *et al.*, 2022) e as condições da ABNT NBR 9778 (2009);

- ii. Ensaios mecânicos: 5 amostras, 6 CPs, totalizando amostra N=30, atendendo os dispostos para análise estatística (Guedes *et al.*, 2022) e as condições da ABNT NBR 7222 (2011). No entanto, 10 CPs foram descartados a partir de análise prévia de homogeneização dos dados, resultando em N=20, igualmente atendendo os dispostos para análise estatística (Guedes *et al.*, 2022).

Para a análise estatística, foi utilizada o método da Análise de Variâncias (ANOVA) com utilização de Teste de Tukey para comparação de médias e com verificação de pressupostos de homogeneidade e normalidade. Para a verificação da normalidade, foram utilizados os testes de Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov. Para a verificação da homogeneidade, foram utilizados os testes de Levene e Bartlett. Para consideração dos resultados, foi adotado um nível de significância de 5% (Guedes *et al.*, 2022). Todos os testes da análise estatística foram realizados no ambiente do software R Studio versão 3.3.0.

Na análise das propriedades físicas, a análise estatística foi realizada em dois processos: no cálculo das médias das medidas aferidas e no cálculo dos índices físicos (absorção de água, índice de vazios, massa específica e variação dimensional), uma vez que o cálculo dos índices, conforme visto anteriormente, considera várias variáveis no processo. Para a análise das propriedades mecânicas, foi aplicada a análise estatística apenas no cálculo da resistência a tração, uma vez que esse cálculo considera a força individual aplicada em CP. Para comparação de médias, foram utilizados os testes de Tukey, SNK, Duncan, T e Scott-Knott.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados

3.1.1 Propriedades físicas

Os valores médios das medições aferidas dos CPs, relacionados aos parâmetros de cálculo para determinação dos índices físicos, após análise estatística são expostos na Tabela 4.

Tabela 4: Dados obtidos de medições após análise estatística.

CP	Ms,méd (g)	VDs,méd		Mi,méd (g)	Msat,méd (g)	VDsat,méd	
		Com (mm)	Dia (mm)			Com (mm)	Dia (mm)
BT	334,54 a	98,7225 bc	50,1225 a	200 a	393,84 a	98,8575 ab	50,165 a
PDC	329,605 c	98,52 c	50,1775 a	197,5 b	392,5025 a	98,445 b	50,3325 a
PBC	332,55 b	99,82 a	50,1725 a	198 ab	394,4925 a	99,665 a	50,2475 a
NCC	330,495 c	99,65 ab	50,1175 a	198 ab	394,9375 a	99,6875 a	50,265 a
C	326,655 d	98,5 c	50,0925 a	199 ab	393,975 a	98,745 ab	50,2275 a

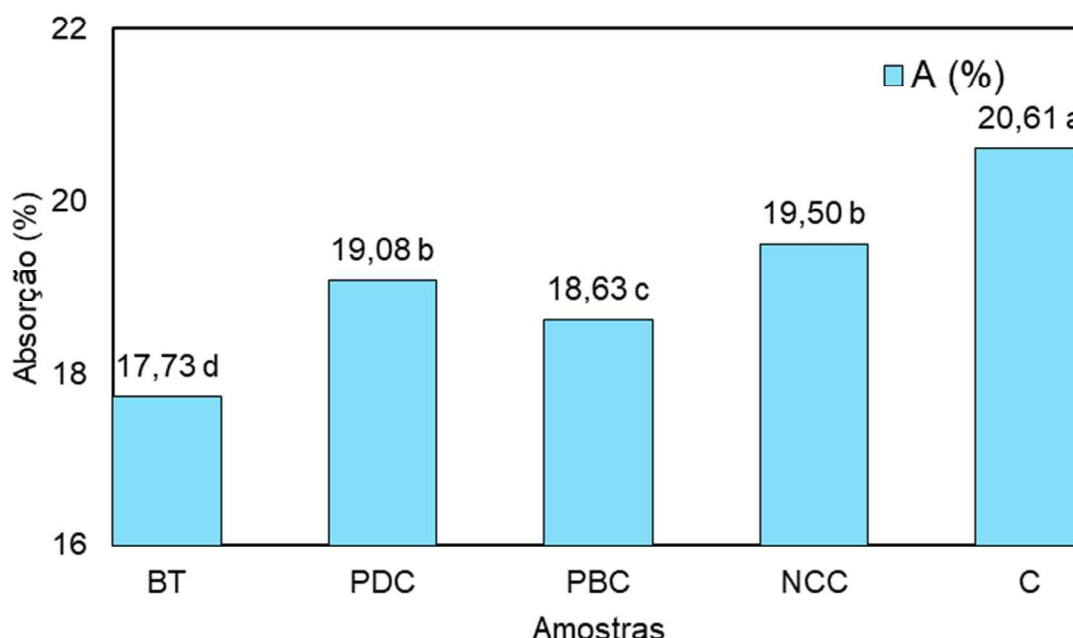
A Tabela 4 correlaciona medidas de massa seca, variação dimensional de comprimento e diâmetro, secos, massa imersa, massa saturada variação dimensional de comprimento e diâmetro, saturados, para as 5 amostras ensaiadas. Os índices com letras indicam semelhanças significativas encontradas a um nível de significância de 5%. A partir deles, é possível notar que:

- i. O maior valor de massa seca, da amostra BT, difere das demais, assim como da amostra PBC. Existe semelhança significativa entre os valores para PDC e NCC. O menor valor de massa é referente a amostra controle (c) e difere das demais;
- ii. Em relação a variação dimensional, o maior comprimento foi encontrado na amostra PBC, que difere às demais, porém possui semelhante parcial com o valor de NCC. Os valores mínimos, de C e PDC, são semelhantes entre si e possuem semelhança parcial com o valor de BT. Sobre os diâmetros, não houveram diferenças significativas;
- iii. Sobre as massas imersas, o valor máximo, BT, e o mínimo, PDC, são diferentes entre si, mas PBC, NCC e C, possuem semelhança parcial com ambos;
- iv. Relativo à massa saturada, não houveram diferenças significativas entre si;
- v. Em relação a variação dimensional saturada, os maiores comprimentos foram encontrados em PBC e NCC, semelhantes entre si, e que diferem do valor mínimo de PDC. BT e C, são semelhantes entre si e possuem semelhança parcial com PBC, PDC e NCC. Sobre os diâmetros, não houveram diferenças significativas

3.1.2 Absorção de água

A Figura 9 expõe o índice de absorção de água calculado (Equação (1)) para cada amostra analisada, após análise estatística. O maior valor, da amostra C, teor de controle sem adição de amostras, se mostra o maior índice, e que difere dos demais. Os valores para NCC e PDC são semelhantes significativamente entre si, e diferem aos demais. O índice de PBC também indica que não possui semelhança com nenhum dos demais valores, sendo um dos menores índices encontrados. O menor valor, apresentado por BT, se compõe de forma que totalmente difere aos demais.

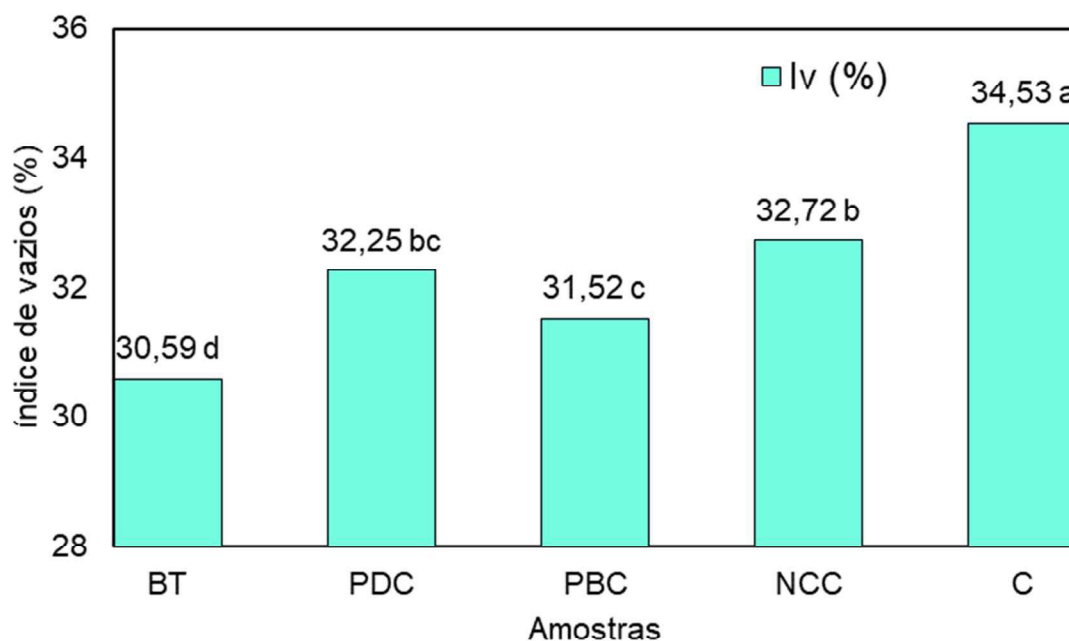
Figura 9: Gráfico de absorção de água, após análise estatística.



3.1.3 Índice de vazios

A Figura 10 demonstra a análise estatística para os índices de vazios calculados (Equação (2)) ao longo dos tratamentos. É possível observar que existem 4 faixas de distinção significativas entre as amostras. O maior índice, da amostra C, difere das demais. Os valores intermediários, das amostras PBC e NCC diferem significativamente entre si e em relação às demais, tendo, na amostra PDC, um compartilhamento de semelhança parcial com ambas. O menor valor absoluto é da amostra BT, que também difere às demais.

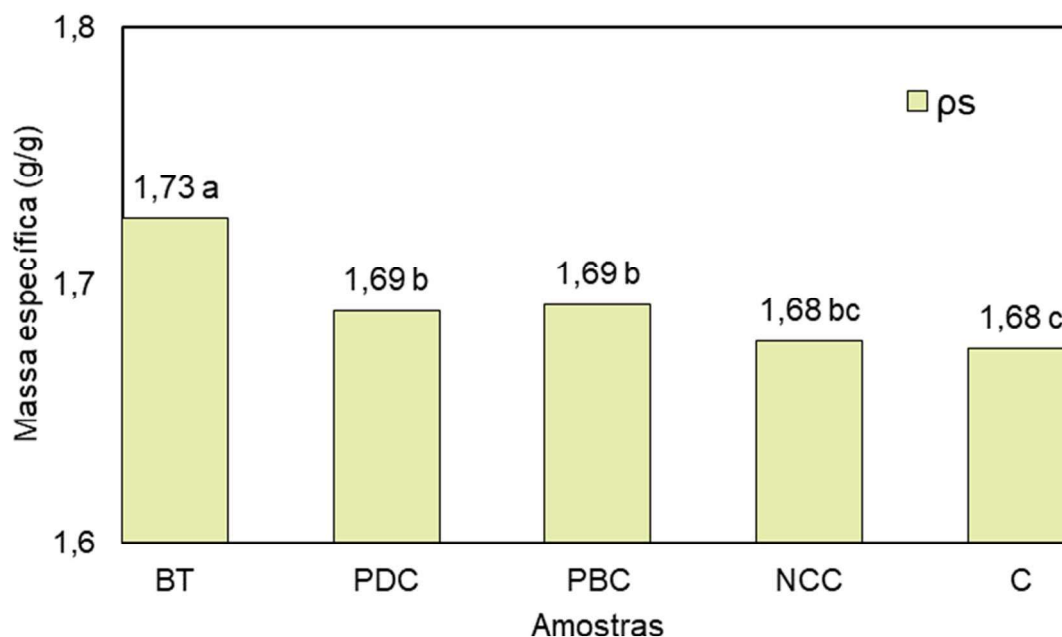
Figura 10: Gráfico de índice de vazios, após análise estatística.



3.1.4 Massa específica

A Figura 11 demonstra as relações encontradas, após análise estatística, entre as massas específicas calculadas (Equação (3)) das amostras. Um comportamento distinto aos demais índices, anteriormente vistos, é observado. Existem apenas 3 faixas de distinção significativa entre os tratamentos. O maior índice de massa específica, é encontrado de forma isolada na amostra BT. PBC e PDC compartilham semelhança significativa entre seus valores. Igualmente de maneira isolada e distinta às demais, a amostra C teve o menor índice de massa específica. Interessante notar que a amostra NCC compartilha semelhança significativa parcial com as amostras PDC, PBC e C.

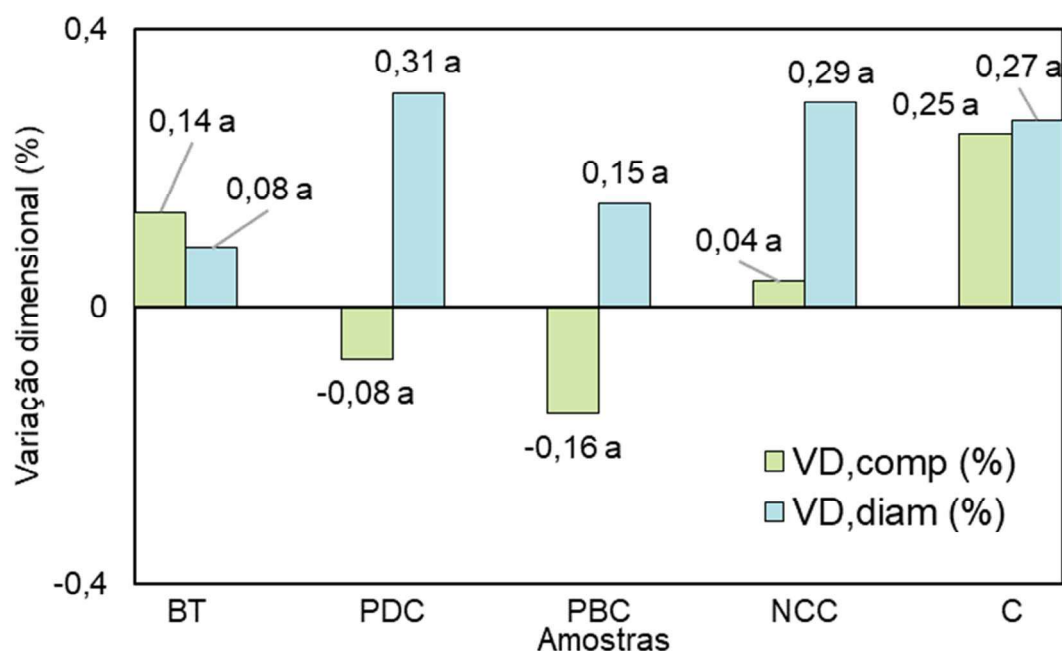
Figura 11: Gráfico de massa específica, após análise estatística.



3.1.5 Variação Dimensional

A Figura 12 aponta para as relações obtidas, após análise estatística, da variação dimensional calculada (Equação (4)) entre as amostras, considerando as dimensões de comprimento e diâmetro. De maneira inédita às observações anteriores verificadas, não houveram distinções entre os índices apresentados para as amostras indicando, logo, que as amostras BT, PDC, PBC, NCC e C são semelhantes de forma significativa entre si, nessa propriedade. No entanto, também é importante salientar que houve casos de retração, variação negativa das dimensões, porém, como possível de relacionar pela ordem das variações apresentadas, se encontram dentro de uma mesma faixa de significância em relação às demais variações.

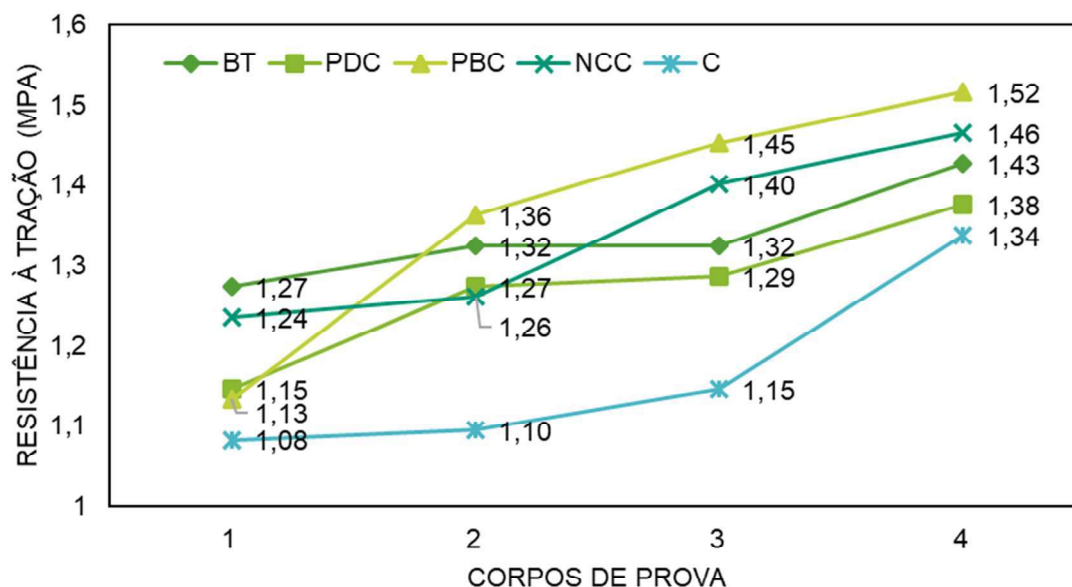
Figura 12: Gráfico de variação dimensional de comprimento e diâmetro, após análise estatística.



3.1.6 Propriedades mecânicas

A Figura 13 expõe os valores de resistência a tração, calculados pela compressão diametral (Equação (5)) aos 28 dias. As resistências foram organizadas de modo crescente, para cada um dos tratamentos ensaiados e mostram a relação aos 4 CPs constituintes de cada amostra. É possível notar indícios de superioridade no desempenho de amostras como PBC e NCC, em relação às demais. Da mesma maneira que são encontrados indícios de inferioridade no desempenho demonstrado pela amostra controle. Ambos os indícios foram tratados na análise estatística e são mostrados na Figura 14 seguinte.

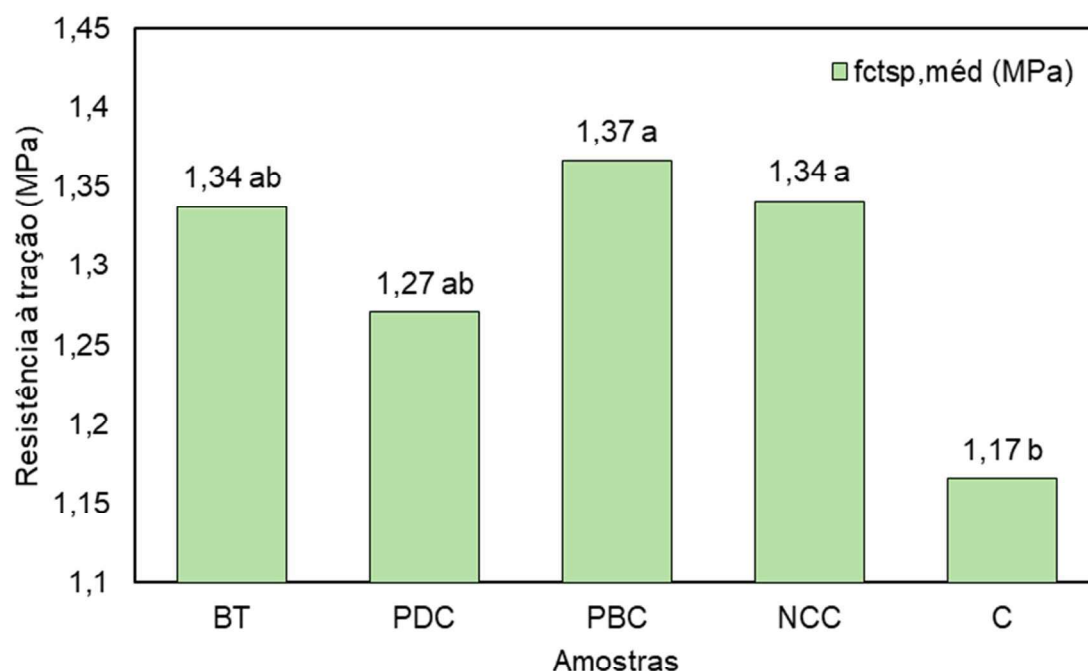
Figura 13: Dispersão de valores obtidos em ensaio de resistência a compressão diametral, para obtenção da tração, correlacionando amostra aditivada, CP e resistência obtida.



3.1.7 Resistência a tração

A Figura 14 mostra as relações encontradas, após a análise estatística, para os valores médios de resistência a tração, em cada amostra. Existem 2 faixas distintas significativas entre as amostras ensaiadas. Na faixa de maior desempenho, logo, maior resistência a tração, estão as amostras PBC e NCC, significativamente semelhantes entre si e diferentes aos demais tratamentos. De forma oposta, o menor desempenho na resistência a tração é apresentado pela amostra C. Os tratamentos BT e PDC, se mostram de maneira intermediária, com valores que denotam semelhança entre si, e parcialmente, com os resultados das demais amostras, PBC, NCC e C. Apesar do resultado encontrado no tratamento BT, por se tratar de amostra in natura, sua validade para os objetivos do estudo é descartada.

Figura 14: Gráfico de resistência a tração, após análise estatística.



Considerando os expostos nas Figuras anteriores 9 a 14, acerca dos índices físicos e de resistência mecânica à tração, bem como o desempenho de cada uma das amostras ensaiadas, é possível realizar inferências. De maneira geral, foi possível observar, com significância, que PBC e NCC, tratamentos com adição de nanofibras e nanocristais do bambu, tiveram desempenhos superiores aos demais tratamentos. De maneira similar, C, a amostra controle, sem adição de tratamentos, apresentou desempenho inferior aos demais, também de modo significativo. Assim, comparando ambas as amostras aditivadas com nanofibras e nanocristais do bambu, com a amostra sem adição, é possível obter a Tabela 5.

Tabela 5: Comparativo entre as alterações promovidas pela adição de nanofibras e nanocristais de celulose, em relação à amostra controle.

Propriedade	PBC	NCC
A	-9,61%	-5,39%
I_v	-8,72%	-5,24%
ρ	+0,59%	=
VD	=	=
Resistência	+14,60%	+12,70%

Na Tabela, é notório que PBC e NCC tiveram desempenho significativamente superior, indicando que o potencial da adição da nanofibras e nanocristais de celulose, é notório. A adição de nanofibras (PBC) diminuiu a absorção de água e os índices de vazios, resultando em um compósito mais estável, similar ao que ocorre na adição de nanocristais de celulose (NCC). A adição de nanofibras do bambu resultou no aumento da massa específica, ao passo que a adição de nanocristais do bambu não interferiu nessa propriedade. As variações dimensionais também não sofreram interferência na adição de nanofibras e nanocristais de celulose do bambu. Finalmente, ambas as adições aumentaram a resistência a tração, de modo que as nanofibras de bambu tiveram um aumento levemente maior que o proporcionado pela adição de nanocristais do bambu.

3.2 Discussões

3.2.1 Absorção de água

Os menores índices obtidos, referentes à adição de bambu triturado e da polpa de nanofibras, se mostraram superiores aos índices encontrados em compósitos com granito (Mendes; Effting; Schackow, 2020). De maneira similar, compósitos com fibra de coco possuíram baixo índice de absorção de água, comparado aos índices aqui calculados, mesmo que para as menores porcentagens exibidas (Capelin *et al.*, 2020). O intervalo de valores obtidos para as amostras nos tratamentos indicados, foram equiparados aos índices de absorção em compósitos com fibra de kenaf e também nos compósitos com fibra de juta (Dias *et al.*, 2024). Igual relação de proporcionalidade foi encontrada em argamassas enriquecidas com fibra de polipropileno, pó de mármore e sílica ativa (Oliveira *et al.*, 2023). Assim, é possível notar que, correlacionando os obtidos com adição de fibras sintéticas e naturais, ocorreram divergências e

semelhanças, indicando ser um índice que possui valores identitários próprios ao material de investigação.

3.2.2 Índice de vazios

O intervalo de valores encontrados para o índice de vazios, variando do mínimo para o bambu triturado, até o valor máximo, da adição de nanocristais de celulose, dispõe-se de forma similar aos obtidos por compósitos a base de granito (Mendes; Effting; Schackow, 2020). Porém, variam de forma divergente quando em comparação com compósitos aditivados de fibra de coco, tendo estes, chegados a representar 50% dos obtidos com adição de bambu triturado (Capelin *et al.*, 2020). Portanto, destas relações é possível observar que a adição de fibras vegetais, essencialmente as que possuem adição com material granular particulado, tendem a diminuir o índice de vazios, pelo próprio arranjo granulométrico, em comparação a adição dos componentes com configurações fibrosas.

3.2.3 Massa específica

O índice de massa específica possuiu a menor variação em amplitude, dentre as amostras ensaiadas. De forma similar ao encontrado, vem os índices de massa específica para compósitos com adição de fibras de coco com eucalipto e os com adição de fibras de sisal (Savastano Junior; Pimentel, 2000). No entanto, os obtidos com nanofibras e nanocristais são de ordem menor do que para os encontrados em compósitos de microcelulose cristalina oriundos da fibra do coco (Capelin *et al.*, 2020). Compósitos argamassados com adição granítica atestaram valor ainda mais superior aos que obtidos com as fibras de bambu e coco (Mendes; Effting; Schackow, 2020). Dessa forma, é notório que as propriedades do peso específico do bambu, quando comparado a outros materiais, devido a relação peso-volume, beneficiou de forma a otimizar a massa específica aqui obtida.

3.2.4 Variação dimensional

De maneira proporcional, o comportamento do índice de variação dimensional ocorreu semelhante ao visto em compósitos com fibra de coco, comparado aos índices

aqui calculados, mesmo que para as menores porcentagens exibidas (Capelin *et al.*, 2020). Igual relação de proporcionalidade foi encontrada em argamassas enriquecidas com fibra de polipropileno, pó de mármore e sílica ativa (Oliveira *et al.*, 2023). Desta forma, é possível observar que a inclusão das fibras, vegetais ou sintéticas, não causam alteração significativa no comportamento de variação dimensional dos compósitos obtidos, oferecendo estabilidade dimensional ao longo dos obtidos.

3.2.5 Resistência a tração

Os índices de resistência à tração foram significativamente obtidos, essencialmente, considerando o desempenho com e sem as adições. De maneira similar, apresentando valores absolutos levemente inferiores, os tratamentos com nanofibras e nanocristais de celulose do bambu encontraram-se na margem, quando observadas as resistências obtidas por outros compósitos de fibras vegetais, como os teores com incorporação de sisal e coco (Savastano Junior; Pimentel, 2000). Quando considerados gêneros de bambu, o comportamento das nanofibras também se assemelha ao obtido em compósitos com *Guadua spp.*, devido o parentesco da família (Morais, 2021). De maneira intermediária, porém com maior distância absoluta, estão os tratamentos com incorporação de fibras sintéticas, como polipropileno e adição de sílica ativa (Oliveira *et al.*, 2023). Finalmente, com a maior distância absoluta às resistências aqui encontradas, estão os compósitos aditivados de material para alto desempenho, como as fibras de vidro e as fibras de aço (Furian *et al.*, 2022; Suk; Ferrari, 2024). Assim, é notório que os resultados possuem o comportamento esperado para uma fibra vegetal, dentro da margem observada, porém, distante ainda de compósitos de alto desempenho.

4 CONCLUSÕES

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas do compósito cimentício com incorporação de nanofibras e nanocristais de celulose do bambu *Guadua weberbaueri*, mostrando propriedades interessantes. As análises estatísticas indicou que existe significância nos resultados obtidos entre as amostras de controle, bambu triturado,

polpa deslignificada de celulose, polpa branqueada de celulose (nanofibras) e nanocristais de celulose, de modo que, considerando apenas os tratamentos finais, a incorporação das nanofibras diminuiu o índice de vazios e a absorção de água, causou um leve aumento na massa específica, não causou variação dimensional e aumentou a resistência à tração em 14,60%, ao passo que a incorporação dos nanocristais teve o mesmo comportamento (diferenciando pelo fato de que não causou variação na massa específica) e obteve melhoria de 12,70% no aumento da resistência à tração. Portanto, pode-se indicar a viabilidade técnica na utilização de nanofibras e nanocristais de celulose como aditivos à resistência à tração em compósitos, permitindo aliar engenharia civil, sustentabilidade e nanotecnologia.

REFERÊNCIAS

BARRAZA, M. T.; TAMBARA JUNIOR, L. U. D.; ONGHERO, L.; GLEIZE, P. J. P.; AZEVEDO, A. R. G. de. **Propriedades físico-mecânicas de argamassas geopoliméricas reforçadas com fibras poliméricas naturais e sintéticas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 14., 2023. Anais [...]. [S. l.], 2023. DOI: 10.46421/sbta.v14.4789. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/4789>. Acesso em: 7 abr. 2024.

BARROS, J. G.; LOPES, J. N. P.; LEITE, L. L.; MACIEL, J. K. V. S.; ARRUDA, T. R.; BATISTA, Y. B. G.; BANDEIRA, D. J. A.; OLIVEIRA, H. W. G. dos S. Viabilidade do uso de fibras vegetais para construções sustentáveis: uma revisão. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [S. l.], v. 21, n. 11, p. 19754–19771, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n11-063. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2086>. Acesso em: 7 apr. 2024.

CAPELIN, L. J., MORAES, K. K., ZAMPIERI, J. P., & VANDERLEI, R. D.. (2020). Avaliação dos efeitos da fibra de coco e da microcelulose cristalina nas propriedades de argamassas cimentícias. **Matéria (rio De Janeiro)**, 25(1), e–12551. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0876>.

CZOVNY, C. K., GIDRÃO, G. DE M. S., BILCATI, G. K., LENGOWSKI, E. C., BOSSE, R. M., & SILVESTRO, L.. (2024). Fresh and hardened properties of cementitious composites with the addition of nanofibrillated cellulose. **Revista IBRACON De Estruturas E Materiais**, 17(2), e17202. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000200002>.

DIAS, B. Z., ALVAREZ, C. E. DE ., MENEGHETTI, L. C., & LARA, A. H.. (2024). Compósitos termorrígidos vegetais: absorção de água e retenção das propriedades mecânicas após intemperismo. **Ambiente Construído**, 24, e127325. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100708>.

FURIAN, B. O., PIMENTEL, L. L., FORTI, N. C. S., & JACINTHO, A. E. P. G. A.. (2022). Análise do comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado e adição de fibras de aço e de vidro AR. **Matéria (Rio De Janeiro)**, 27(1), e202145749. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-45749>.

GUEDES, D. M., RODRIGUES, L. R., BRAVO, J. M., MARQUES, D. M. L. DA M., FRAGOSO JÚNIOR, C. R., CAVALCANTI, J. R., & NASCIMENTO, G.. (2022). Definition of water quality variability parameters and dynamics to improve management in a deep canyon type subtropical hydroelectric reservoir. **RBRH**, 27, e13. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220210126>.

LOPES, J. P., FERRARI, V. J., CAMÕES, A., SOUZA, A., & FANGUEIRO, R.. (2022). Influência de nanotubos de carbono sobre o desempenho de concreto e de concreto reforçado com fibras (CRF). **Matéria (Rio De Janeiro)**, 27(2), e13197. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1397>.

LUCIO, F. da S.; XAVIER, G. B.; MESQUITA, A. A.; MOREIRA, J. G. do V.; SANTOS, W. L. dos.; SERRANO, R. O. P. Variação granulométrica e morfológica dos sedimentos de fundo do Rio Acre: contribuições iniciais ao estudo hidrossedimentológico de canal fluvial no Sudoeste Amazônico. **UÁQUIRI - Revista do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 19, 2020. DOI: 10.47418/uaquiri.vol2.n2.2020.3803. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/Uaquiri/article/view/3803>. Acesso em: 3 abr. 2024.

MENDES, G. A.; EFFTING, C.; SCHACKOW, A. Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granitos: propriedades físicas e mecânicas. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 403–418, jul. 2020.

GAMONAL, C. M.; ITURRALDE, A. J. B. Potencialidades de los nanoproduitos en proyectos de diseño industrial. **A3manos**, [S. l.], v. 11, n. 21, 2024. Disponível em: <https://a3manos.isdi.co.cu/index.php/a3manos/article/view/380>. Acesso em: 7 abr. 2024.

MORAIS, C. D. N. **Produção e utilização de nanofibras celulósicas de taboca (*Guadua spp*) para reforço de compósitos cimentícios**. Dissertação de mestrado (Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia). Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre, 2021.

NASCIMENTO, C. B. D.; BARBOSA, V. M.; BARBOSA, C. E. D. S. M.; MOTAO, W. K. B.; OLIVEIRA, V. C. D. **Análise das propriedades de argamassas produzidas com diferentes fibras naturais**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 14., 2023. Anais [...]. [S. l.], 2023. DOI: 10.46421/sbta.v14.4805. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/4805>. Acesso em: 7 abr. 2024.

NUNES, M. R. da S.; RAMOS, D. da P. .; ANTONIA ELIANE COSTA SENA; MORAIS, C. D. do N.; RAMOS, A. L. .; RODRIGUEZ, A. F. R.; FARIA, F. S. E. D. V.. Preparação e caracterização de polpa celulósica de bambu *Guadua weberbaueri*: tecnologia. **South American Journal of Basic Education, Technical and**

Technological , [S. l.], v. 8, n. 2, p. 217–232, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/4306>. Acesso em: 18 abr. 2024.

OLIVEIRA, J. M. Z.; MELO-FILHO, J. de A. Evaluation of the durability of cementitious composites reinforced with natural vegetable fibers from the Amazon. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. e67006, 2024. DOI: 10.34117/bjdv10n2-004. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/67006>. Acesso em: 7 apr. 2024.

OLIVEIRA, S., SORANÇO, L., PEREIRA, T., GAMES, B., FERREIRA, C., & BARBOSA, M. T.. (2023). Estudo da adição de fibras de máscaras faciais N95, sílica ativa e pó de mármore em argamassa de alto desempenho. **Matéria (Rio De Janeiro)**, 28(2), e20230042. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0042>.

PEREIRA, W. A., CERON, I., SILVA, M. S. E ., FREITAS, M. P. C. DE ., SILVA, E. R. DA ., & COSTA, F. M. DA .. (2021). Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. **Matéria (Rio De Janeiro)**, 26(1), e12932. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1232>.

SAVASTANO JUNIOR, H.; PIMENTEL, L. L.. Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 103–110, jan. 2000.

SUK, D. A.; FERRARI, V.. Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em vigas submetidas ao cisalhamento. **Ambiente Construído**, v. 24, p. e129720, jan. 2024.

VIANA, T. H. C.; SENA, A. E. C.; SILVA, M. S.; MAIA, B. R. S.; NUNES, M. R. S.; FRAGA, Y. S. B.; MURAD, J. R. L.; RODRIGUEZ, A. F. R. Synthesis and characterization of nanofibers and nanocrystals of cellulose from *Guadua weberbaueri*. **Ciência e Natura**, Santa Maria. 2024.

VOTORANTIM. FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ – Revisão nº00 06/01/2020. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/mapa-da-obra-producao/wp-content/uploads/2015/12/FISPQ-Cimento-Rev-00_-2020.pdf. Acesso em: 03 de Mar. De 2024.

3 CONCLUSÕES GERAIS

A síntese e aplicação das nanofibras e nanocristais de celulose, obtidos do bambu *Guadua weberbaueri*, se deram de forma satisfatória. A revisão bibliográfica apontou para a lacuna existente nas pesquisas com a fibra de bambu da espécie citada, o que possibilitou a existência do presente estudo. A síntese, em conjunto com as análises de caracterização, permitiu apontar para um comportamento térmico estável, baixo nível de composto orgânico como a lignina e hemicelulose, e alto em celulose, além de a presença de compostos silicatos, na composição química, serem indicados para o uso incorporado em compósitos cimentícios. Nessa aplicação, quando submetidos a ensaios mecânico e físicos, ficou constatada a inalterabilidade ou melhoria, dos índices físicos, além de melhoria no desempenho mecânico de resistência à tração. Comprovando, portanto, a viabilidade técnica na utilização, permitindo aliar a sustentabilidade, com nanotecnologia e engenharia civil.

4 RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS

- Síntese e caracterização de nanofibras oriundas de demais espécies de bambu amazônico;
- Estudo comparativo entre as propriedades químico-térmicas de diferentes bambus amazônicos;
- Aplicação de nanofibras vegetais amazônicas a partir de métodos alternativos de hidrólise ácida;
- Ensaio mecânicos de resistência a tração e compressão com nanocristais sintetizados com diferentes métodos de hidrólise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. DE S., PEREIRA, C. H. DE A. F., & FIGUEIREDO, E. J. P.. (2023). Estudo da adição de fibras kraft (embalagens de cimento recicladas) nas propriedades químicas e microestruturais de matrizes cimentícias. **Matéria (rio De Janeiro)**, 28(2), e20230065. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0065>.

AMARAL, E. F.; CARMO, L. F. Z.; MACIEL, A. S.; AMARAL, E. F.; VIANA, J. G. L.; KORTE, G. J.; BARDALES N. G.; ARAÚJO, G. C.. Potencial do uso do bambu nativo para recuperação de reserva legal e de áreas alteradas. **IPAM Amazônia**. 2021. Disponível em: <https://ipam.org.br/bibliotecas/potencial-do-uso-do-bambu-nativo-para-recuperacao-de-reserva-legal-e-de-areas-alteradas/>. Acesso em 12 de Março de 2024.

ARRUDA, M. A.; FERREIRA, D. G.. Nanotecnologia aplicada à engenharia civil: inovação e eficiência para a indústria 4.0. *Anais da Jornada Acadêmica das Engenharias*, v. 4, n. 1, 2023.

BAYMA, M. M. A.; PEREIRA, J. E. S.; DE OLIVEIRA, L. C.; DO AMARAL, E. F.; SIVIERO, A.; MORET, A. de S. Estimativa de volume de Bambu *Guadua* spp. do Acre, Amazônia, Brasil. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, [S. l.], v. 16, n. 42, p. 471–488, 2023. DOI: 10.55905/rdelosv16.n42-030. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/819>. Acesso em: 25 apr. 2024.

BOUBAAYA, R., DJENDEL, M., BENANIBA, S., KESSAL, O., & DRISS, Z.. (2023). Impact of the loading of date palm fibers on the performances of mortars. **REM - International Engineering Journal**, 76(2), 159–168. <https://doi.org/10.1590/0370-44672022760052>.

CHAHINEZ, A., ABDERRAOUF, B. A., YACINE, A., & OUSSAMA, K.. (2023). Experimental study on flexural creep of self-compacting concrete reinforced with vegetable and synthetic fibers. **REM - International Engineering Journal**, 76(3), 229–237. <https://doi.org/10.1590/0370-44672023760005>.

CRUZ-VELASCO, L.; CHAMORRO-MEJIA, J.; CORDOBA-CELY, C.. Characterization Physico-chemical and mechanical of 4 vegetable fibers used as artisanal raw materials in the Department of Nariño. **Dyna rev.fac.nac.minas**, Medellín , v. 88, n. 216, p. 96-102, Mar. 2021. Available from <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532021000100096&lng=en&nrm=iso>. access on 15 Mar. 2024. Epub May 24, 2021. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.87958>.

DURÁN, N., FÁVARO, W. J., ALBORÉS, S., COSTA, T. S. DA ., & TASIC, L.. (2023). Biogenic Silver Nanoparticles Capped with Proteins: Timed Knowledge and Perspectives. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 34(7), 897–905. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20230062>.

GIUSEPPINA VANGA, M.; BRIONES, O.; ZEVALLOS, I. y DELGADO, D.. Bioconstrucción de vivienda unifamiliar de interés social con caña *Guadua angustifolia* Kunth. **Novasinergia [online]**. 2021, vol.4, n.1.

HERNÁNDEZ-ZAMORA, M. F.; JIMÉNEZ-MARTINEZ, S.; & SÁNCHEZ-MONGE, J. I.. (2021). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. **Revista Tecnología en Marcha**, 34(2), 3-10. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831>.

HORA, T. S.; DOS SANTOS BARBOSA, A. L. Indústria 4.0 na construção civil e técnicas construtivas sustentáveis para habitações de interesse social. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218, [S. l.], v. 4, n. 11, p. e4114537, 2023. DOI: 10.47820/recima21.v4i11.4537. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/4537>. Acesso em: 25 abr. 2024.

LOPES, J. P., FERRARI, V. J., CAMÕES, A., SOUZA, A., & FANGUEIRO, R.. (2022). Influência de nanotubos de carbono sobre o desempenho de concreto e de concreto reforçado com fibras (CRF). **Matéria (rio De Janeiro)**, 27(2), e13197. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1397>.

MARIN, D., CHIARELLO, L. M., WIGGERS, V. R., OLIVEIRA, A. D. DE ., & BOTTON, V.. (2023). Effect of coupling agents on properties of vegetable fiber polymeric composites: review. **Polímeros**, 33(1), e20230012. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220118>.

MORAIS SOUZA, A. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BLOCO CERÂMICO CONVENCIONAL E BLOCO SOLO-CIMENTO. **Revista Multidisciplinar do Sertão**, v. 5, n. 2, p. 244-251, 30 jun. 2023.

MORAIS, C. D. N. **Produção e utilização de nanofibras celulósicas de taboca (*Guadua spp*) para reforço de compósitos cimentícios**. Dissertação de mestrado (Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia). Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre, 2021.

PEREIRA JUNIOR, A., PRADO, A. F., NUNES, E. C., MIRANDA, M. G., BUSSMEYER, T., & ARMESTO, L. M.. (2021). Nanotecnologia aplicada às estruturas metálicas: estudando o nanografeno como majorador de resistência estrutural. **Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação**, 7(11), 982–993. <https://doi.org/10.51891/rease.v7i11.3127>.

PEREIRA, F. C.; LEAL, C. E. F.; FERREIRA, F. G. S. Efeitos da nanossílica no desempenho e na durabilidade de concretos submetidos ao ataque de CO₂. **CONCRETO & Construções**. Ed. 103. 2021. p. 67-73.

PEREIRA, W. A., CERON, I., SILVA, M. S. E ., FREITAS, M. P. C. DE ., SILVA, E. R. DA ., & COSTA, F. M. DA .. (2021). Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. **Matéria (rio De Janeiro)**, 26(1), e12932. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1232>.

SANTOS, R. A. R.; BISPO, V. M.; TEDESCHI, V.. Nanociência na engenharia civil: um estudo exploratório do grafeno na construção civil. **Revista Tecnológica da FATEC-PR**, Curitiba, Edição Especial, p. 38–46, 2021. Disponível em: <http://chamadosfatecpr.com.br/revista/index.php/fatec/article/view/51/46>. Acesso em: 01/07/2022.

RODRIGUEZ-SOTELO, J. A., ABANTO-RODRÍGUEZ, C., FLORES-ROMAYNA, M. A., RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, K. I., CASTILLO-TORRES, D. DEL ., GUERRA-ARÉVALO, W. F., GARCÍA-SORIA, D. G., GUERRA-ARÉVALO, H., & REVILLA-CHÁVEZ, J. M.. (2023). Propiedades físicas y mecánicas de *Guadua lynnclarkiae*, *Guadua weberbaueri* y *Guadua superba* en Ucayali, Perú. **Ciência Florestal**, 33(1), e68029. <https://doi.org/10.5902/1980509868029>.

ROSS, S.; ALEXANDER, M.. Viability of whole-culm bamboo construction in South Africa - a preliminary assessment. **S. Afr. j. sci., Pretoria** , v. 118, n. 7-8, p. 1-7, Aug. 2022.

RUIVO, C. C. G. P. Desenvolvimento de argamassa para reparo de estruturas na construção civil utilizando óxido de grafeno como aditivo / Mortar development for repair of structures in civil construction using graphen oxide as an additive. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 8082–8100, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n1-549. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/23550>. Acesso em: 13 mar. 2024.