



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**O EFEITO ADIÇÃO DA FIBRA DA FOLHA DA CARNAÚBA (*Copernícia  
prunífera*) COMO REFORÇO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO

Orientadora: Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen  
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

João Pessoa, PB.  
Dezembro de 2024

ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO

**O EFEITO ADIÇÃO DA FIBRA DA FOLHA DA CARNAÚBA (*Copernícia prunífera*) COMO REFORÇO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen  
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

João Pessoa, PB.  
Dezembro de 2024

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

V817e Virginio, Itamira Raquel Santos.

O efeito adição da fibra da folha da carnaúba (Copernícia prunífera) como reforço em argamassas de revestimento / Itamira Raquel Santos Virginio. - João Pessoa, 2024.

98 f. : il.

Orientação: Renate Maria Ramos Wellen.

Coorientação: Marcos Alyssandro dos Anjos.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Fibras vegetais. 2. Argamassas de revestimento.  
3. Carnaúba - Copernícia prunífera. I. Wellen, Renate Maria Ramos. II. Anjos, Marcos Alyssandro dos. III. Título.

UFPB/BC

CDU 677.1/.2(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Ata da defesa de dissertação de mestrado apresentada pela aluna ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO, no dia 19 de dezembro de 2024.

Às dez horas do dia 19 de dezembro de 2024, na sala de aula do Laboratório de Solidificação Rápida, no Centro de Tecnologia, reuniram-se os membros da banca examinadora composta pelos Professores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> RENATE MARIA RAMOS WELLEN (Presidente, Orientadora); Prof. Dr. MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS (Co-orientador); Prof. Dr. RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA (Examinador Interno) e Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES (Examinador Externo ao Programa), a fim de avaliarem a dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, com título "O EFEITO ADIÇÃO DA FIBRA DA FOLHA DA CARNAÚBA (Copernícia nucifera) COMO REFORÇO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO" de autoria da aluna ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO, matrícula 20221015639. A reunião foi aberta pelo Presidente da banca, que deu início aos trabalhos autorizando a candidata a iniciar sua apresentação. Concluídos os trabalhos de apresentação e de arguição, a Comissão Examinadora emitiu o seguinte parecer:

<p>A discente defendeu a dissertação de mestrado dentro do limite de tempo previamente definido e respondeu satisfatoriamente às arguições da banca. As sugestões da banca serão acatadas e inseridas no documento final dentro do prazo definido pelos membros da banca de 60 (sessenta) dias.</p>
---

A aluna é obrigada a realizar as sugestões da banca. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora além da referida discente que apresentou a defesa de seu mestrado.



Documento assinado digitalmente

**RENATE MARIA RAMOS WELLEN**

Data: 27/12/2024 10:10:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> RENATE MARIA RAMOS WELLEN  
(Presidente, Orientadora)



Documento assinado digitalmente

**MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS**

Data: 26/12/2024 18:56:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS  
(Co-orientador)



Documento assinado digitalmente

**RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA**

Data: 20/12/2024 17:51:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA  
(Examinador Interno)



Documento assinado digitalmente

**SANDRO MARDEN TORRES**

Data: 19/12/2024 15:47:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES  
(Examinador externo ao Programa)



Documento assinado digitalmente

**ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO**

Data: 27/12/2024 13:07:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO  
(Discente)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sua imensa bondade e por conceder todas as conquistas que realizei em minha vida, colocando em meu caminho as pessoas maravilhosas que me auxiliaram nessa jornada.

Aos meus queridos pais Tânia e Edson (*in memoriam*) pelo amor e apoio incondicional que dedicaram a mim em tudo que me propus a realizar.

Ao meu noivo, Waldeir, por todo o amor, carinho, paciência, companheirismo, incentivo e dedicação, por ser meu porto seguro não me deixando desistir em meus momentos de dúvida e insegurança.

A minha orientadora, Professora Dra. Renate Maria Ramos Wellen, por todos os ensinamentos transmitidos, oportunidade de aprendizagem, paciência, confiança e por não desistir de mim.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Marcos Alyssandro dos Anjos, com quem aprendo mais a cada conversa, pela disposição em contribuir desde o início com a definição do tema da pesquisa, pelas sugestões valiosas e pela acolhida no laboratório de materiais do IFPB, fundamentais para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Aos meus irmãos Ingrid, Igor e Ítalo, pelo incentivo e por compartilharem comigo todos os momentos.

A amiga Pollyane Barros pela disposição em ajudar na aquisição das fibras que permitiram a realização desse trabalho e aos amigos Janaina, William, Isabel e Wigna, sempre presentes contribuindo no corte das fibras.

Ao amigo, Sergio da Silva Júnior, bolsista do projeto de pesquisa em impressão 3D do IFPB, sua colaboração e dedicação durante toda a pesquisa foram fundamentais.

Aos amigos da Diretoria de Obra e Engenharia do IFPB e do prédio da PROEXC do IFPB (Vinicius, Renan, Pablo, Janaina, Mel, Naíza, Joabe, Joyce, Vagner, Hilner, Amando, Diego, José Carlos, Gevânio, Bárbara, Socorro e Erika), pelo apoio oferecido na convivência diária e palavras de incentivo.

Aos técnicos Clésio Luiz, do laboratório de Síntese e Caracterização de Polímeros - LSCP, Ginneton, do Laboratório de Combustíveis e Materiais - LACOM, e Breno Andrade, do Laboratório de Solidificação Rápida - LSR, pela atenção e disposição em ajudar na realização das análises.

Ao Instituto Federal da Paraíba, pela disponibilização dos laboratórios e espaços da instituição para realização da pesquisa, especificamente aos técnicos Gracy Kelly Vasconcelos e Américo Bertulino, da Unidade Acadêmica I pela contribuição na realização dos ensaios.

A Universidade Federal da Paraíba e ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais por possibilitarem que eu desse mais esse passo na minha formação acadêmica, em especial ao Coordenador do Programa Prof. Dr. Daniel Macêdo e aos secretários Karla e Fernando, sempre dispostos a ajudar com eficiência e disposição.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O aproveitamento de fibras vegetais como material de engenharia em substituição a materiais produzidos artificialmente é uma abordagem que tem sido usada para superar as questões ambientais relacionadas à geração de resíduos e ao uso de matérias-primas renováveis. No campo da construção civil as fibras vegetais podem ser utilizadas como reforço de materiais cimentícios para melhorar propriedades como a tenacidade e ductilidade, no entanto, a aplicação das fibras para este fim encontra limitações associadas à heterogeneidade, à alta hidrofiliabilidade e à instabilidade da fibra quando submetida ao meio alcalino. A Carnaúba é uma palmeira nativa da região Nordeste do Brasil, objeto de pesquisas em diversas áreas, todavia, sua aplicação em materiais cimentícios ainda é pouco explorada na literatura. Nesse estudo investigou-se o efeito da adição da fibra da folha da carnaúba como reforço para argamassas de revestimento, variando o teor de fibras e a aplicação de pré-tratamento alcalino com solução de  $\text{CaOH}_2$ . As fibras foram caracterizadas quanto aos aspectos físicos, térmicos e mecânicos, também foram realizadas análises de FTIR e DRX. As fibras foram adicionadas à argamassas de cimento e areia com proporção de 1:3 em massa, no teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Foi realizada a caracterização dos compósitos obtidos no seu estado fresco e no estado endurecido utilizando como parâmetros os ensaios estabelecidos na norma NBR 13281/2023. Os resultados indicaram que a adição de fibras reduziu a fluidez das argamassas e favoreceu a coesão das misturas. A resistência à tração na flexão e à compressão mantiverem os valores semelhantes aos encontrados para a argamassa de referência, reduziram o módulo de elasticidade, indicando que as fibras atuam melhorando a capacidade absorver as deformações sem que ocorra a ruptura do material. Verificou-se que as argamassas com adição de fibras apresentaram valores de retração inferiores à argamassa de referência e ao limite máximo de 0,8mm/m estabelecido pela norma brasileira, com exceção da argamassa com fibras não tratada no teor de 1,5%. Quanto à avaliação da resistência à aderência superficial, para o mesmo teor de fibras, a argamassa com fibras tratadas apresentou resultado superior quando comparada à argamassa com fibra não tratada e à argamassa de referência.

**Palavras-chave:** Carnaúba. Fibras vegetais. Argamassas de revestimento.

## ABSTRACT

The use of plant fibers as engineering materials to replace artificially produced materials is an approach that has been employed to address environmental issues related to waste generation and the use of renewable raw materials. In construction industry, plant fibers can be used as reinforcement in cementitious materials to improve properties such as toughness and ductility. However, the application of fibers for this purpose has limitations associated with heterogeneity, high hydrophilicity and fiber instability when exposed to alkaline environment. The Carnaúba is a palm tree native to the Northeast region of Brazil and the subject of research in various fields. However, its application in cementitious materials is still scarcely explored in the literature. This study investigated the effect of adding carnauba leaf fiber as reinforcement for coating mortars, varying the fiber content and the application of alkaline pretreatment with  $\text{CaOH}_2$  solution. The fibers were characterized in terms of physical, thermal and mechanical aspects, FTIR and XRD analyses were also performed. The fibers were added to cement and sand mortars in a 1:3 mass ratio, at 0.5%, 1.0% and 1.5% contents. The composites were characterized in fresh and hardened states using the tests established by standard NBR 13281/2023. The results indicated that adding fibers reduced the flowability of mortars and enhancing the cohesion of mixtures. The Flexural tensile strength and compressive strength remained similar to reference mortar, but the modulus of elasticity decreased, suggesting that fibers improved the material's ability to absorb deformations without breaking. It was observed that mortars with added fibers showed lower shrinkage compared to the reference mortar and to maximum limit of 0.8 mm/m established by brazilian standard, except untreated fiber mortar with 1.5% fiber content. Regarding the evaluation of surface adhesion strength, for same fiber content, the mortar with treated fibers showed superior results compared to mortar with untreated fibers and reference mortar.

**Keywords:** Carnauba. Plant Fibers. Coating mortars.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das Fibras .....	16
Figura 2 - Estrutura química dos principais constituintes das fibras vegetais .....	18
Figura 3 - Estrutura das fibras vegetais.....	19
Figura 4 - Curva Granulométrica da Areia.....	33
Figura 5 – Fluxograma do Programa Experimental.....	34
Figura 6 – Etapas do Processo de beneficiamento das fibras de carnaúba.....	34
Figura 7 - Etapas do processo de tratamento das fibras (a) Pesagem das fibras (b) solução usada (c) recipiente com as fibras prontas para imersão (d) secagem em estufa .....	35
Figura 8 - Aspecto da fibra moída em peneira com abertura 30MESH (a) antes e (b) após aplicação do tratamento .....	36
Figura 9 - Determinação da massa específica das fibras.....	37
Figura 10 - Determinação do diâmetro médio das fibras.....	41
Figura 11 - Ensaio do índice de Consistência realizado para dosagem da argamassa .....	43
Figura 12 - Procedimento de verificação do índice de consistência.....	47
Figura 13 - Aplicação da Sucção ao prato cheio de argamassa .....	48
Figura 14 - Execução do Ensaio de Squeeze Flow .....	50
Figura 15 - Máquina Universal de Ensaio montada para execução dos ensaios de Flexão .....	51
Figura 16 - Ensaio de compressão axial .....	52
Figura 17 - Execução do Ensaio de Ultrassom .....	54
Figura 18 - Ensaio de Absorção por capilaridade.....	56
Figura 19 - Medidas dos corpos de prova no ensaio de retração.....	59
Figura 20 - Painéis confeccionados para execução do ensaio de resistência de aderência superficial (a) antes e (b) após a execução do revestimento.....	60
Figura 21 - Colagem das pastilhas para execução do ensaio de resistência à aderência superficial .....	61
Figura 22 - Formas de ruptura dos corpos de prova .....	62
Figura 23 - Fibra da Carnaúba .....	64
Figura 24 - Curva de análise térmica das fibras na condição natural e tratada.....	67
Figura 25 - Análise de calorimetria diferencial exploratória.....	68
Figura 26 - Espectros de FTIR para fibras de carnaúba na condição natural e tratada .....	69
Figura 27 - Difratograma da fibra de Carnaúba natural e tratada.....	70
Figura 28 - Índice de Consistência das Misturas.....	73
Figura 29 - Ensaio de índice de consistência das misturas analisadas.....	74
Figura 30 - Densidade de massa e Teor de ar incorporado .....	76
Figura 31 - Retenção de água.....	77
Figura 32 - Perfil típico de do ensaio de squeeze-flow realizado com deslocamento controlado.....	78

Figura 33 - Ensaio de Squeeze Flow para taxa de carregamento de 0,1mm/s (a) após 15 min da mistura e (b) após 65min da mistura.....	79
Figura 34 - Squeeze Flow para taxa de carregamento igual a 3,0mm/s (a) após 10 min da mistura e (b) após 60min da mistura .....	81
Figura 35 - Resistência à flexão aos 7 e 28 dias.....	82
Figura 36 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	83
Figura 37 - Aspecto dos corpos de prova com 1,0% de fibra não tratada (a) após a ruptura (b) após separação das partes rompida e (c) perfil da fratura à flexão .....	84
Figura 38 - Módulo de elasticidade dinâmico .....	85
Figura 39 - Aspecto poroso da argamassa .....	86
Figura 40 - Coeficiente de Absorção por capilaridade.....	87
Figura 41 - Absorção por imersão e índice de vazios .....	88
Figura 42 - Variação dimensional das argamassas.....	89
Figura 43 – Painéis revestidos com argamassa (a) referência (b) FNT0,5% (c) FT0,5%.....	89
Figura 44 - Resultados do Ensaio de Aderência ao substrato .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisas sobre aplicações das fibras de carnaúba.....	24
Tabela 2 - Composição química da fibra de carnaúba não tratada .....	27
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da fibra de carnaúba .....	28
Tabela 4 - Caracterização física da areia .....	33
Tabela 5- Proporções das misturas de argamassa no traço 1:3 .....	44
Tabela 6 - Massa específica e unitária dos materiais constituintes .....	44
Tabela 7 - Determinação do consumo dos materiais .....	45
Tabela 8 - Relação dos ensaios de caracterização das argamassas.....	45
Tabela 9 - Propriedades Físicas da Fibra de Carnaúba .....	63
Tabela 10 - Absorção de água pelas fibras de carnaúba .....	65
Tabela 11 - Intensidade dos picos das redes 001 e 002 identificados na DRX.....	71
Tabela 12 - Resistência à tração direta das fibras de carnaúba.....	72
Tabela 13 - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à flexão das misturas aos 7 e 28 dias .....	82
Tabela 14 - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à compressão das misturas aos 7 e 28 dias .....	83
Tabela 15 - Resistência de aderência à tração e formas de ruptura .....	90

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	centímetro
DRX	Difraco de Raios-X
DSC	Calorimetria diferencial Exploratora
Fa/c	Fator de água cimento
FNT	Fibra não tratada
FT	Fibra tratada
FTIR	Espectroscopia com Transformada de Fourier
g	grama
GPa	gigapascal
IC	ndice de Cristalinidade
kg	quilograma
MEV	Microscopia Eletrnica de Varredura
mm	milímetro
MPa	megapascal
N	newton
NBR	Norma Brasileira
PHB	Polihidroxibutirato
REF	Referência
RPM	Rotao es por minuto
TGA	Termogravimetria

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
	2.1 Objetivo Geral.....	15
	2.2 Objetivos Específicos.....	15
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
	3.1 Fibras.....	16
	3.1.1 Fibras sintéticas e Fibras Naturais.....	16
	3.1.2 Fibras Vegetais.....	17
	3.2 Compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras vegetais.....	20
	3.4 Fibra de Carnaúba ( <i>Copernícia Prunifera</i> ).....	23
	3.4.1 Pesquisas de aplicação da fibra de carnaúba.....	24
	3.4.2 Propriedades da fibra de carnaúba.....	27
	3.4.3 Tratamento da fibra de carnaúba.....	29
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	32
	4.1 Materiais.....	32
	4.1.1 Fibra da Carnaúba.....	32
	4.1.2 Cimento Portland.....	32
	4.1.3 Areia.....	32
	4.2 Métodos.....	33
	4.2.1 Tratamento das fibras.....	34
	4.2.2 Caracterização da Fibra.....	36
	4.2.2.1 Caracterização física da fibra.....	36
	4.2.2.2 Análise Térmica.....	38
	4.2.2.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	39
	4.2.2.4 Difração de raios-X.....	40
	4.2.2.5 Caracterização Mecânica.....	40
	4.2.3 Dosagem e produção das argamassas.....	42
	4.2.4 Caracterização das Argamassas.....	45
	4.2.4.1 Ensaio no Estado Fresco.....	46
	4.2.4.1.1 Índice de Consistência.....	47
	4.2.4.1.2 Ensaio de retenção de água.....	47
	4.2.4.1.3 Ensaio de densidade de massa e teor de ar-incorporado.....	49

4.2.4.1.4	Ensaio de Squeeze Flow .....	49
4.2.4.2	Ensaio no estado endurecido .....	51
4.2.4.2.1	Resistência à tração na flexão e compressão axial .....	51
4.2.4.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico .....	53
4.2.4.2.3	Ensaio de Absorção de água por capilaridade, Absorção por imersão e índice de vazios .....	55
4.2.4.2.4	Ensaio de Variação Dimensional (retração ou expansão linear).....	58
4.2.4.2.5	Resistência de aderência à tração.....	59
4.2.4.3	Análise Estatística.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
5.1	Caracterização das Fibras .....	63
5.1.1	Caracterização física da fibra .....	63
5.1.2	Análise Térmica.....	65
5.1.3	Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	69
5.1.4	Difração de raios-X.....	70
5.1.5	Caracterização Mecânica .....	71
5.2	Caracterização das argamassas.....	72
5.2.2	Ensaio no Estado Fresco.....	72
5.2.2.1	Índice de Consistência.....	73
5.2.2.2	Densidade de massa e teor de ar-incorporado.....	75
5.2.2.3	Retenção de água .....	76
5.2.2.4	Squeeze Flow.....	77
5.2.3	Ensaio no Estado Endurecido.....	81
5.2.3.1	Resistência à tração na flexão e compressão axial .....	81
5.2.3.2	Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	85
5.2.3.3	Absorção por Capilaridade, absorção por Imersão e índice de vazios .....	86
5.2.3.4	Variação Dimensional (retração ou expansão linear) .....	88
5.2.3.5	Resistência de aderência à tração.....	89
6	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93

## 1 INTRODUÇÃO

O descarte de resíduos agrícolas oriundos da atividade agroindustrial e da exploração econômica de materiais disponíveis espontaneamente na natureza é um problema ambiental enfrentado por vários países (Ali *et. al*, 2022), o aproveitamento desses resíduos incorporando-os a produtos é uma abordagem para superar os impactos ambientais (Ahmad e Zhou, 2022), uma ação sustentável que pode contribuir para a redução do impacto ambiental causado pelos processos produtivos ao promover a utilização de recursos renováveis (Da Silveira, 2024).

A substituição de materiais produzidos artificialmente por fibras naturais lignocelulósicas é uma abordagem que tem sido usada para superar as questões ambientais relacionadas ao descarte de resíduos e ao uso de matérias-primas não renováveis (Ahmad e Zhou, 2022), por serem encontradas localmente a um custo relativamente baixo em comparação com as matérias-primas tradicionais (Wani e Ganesh, 2022; Alshaya, 2018). Entre as vantagens para a adoção desses materiais cita-se o baixo consumo de energia utilizado para seu aproveitamento, a disponibilidade local e propriedades, como baixa densidade, alta biodegradabilidade, não toxicidade, baixa condutividade térmica e acústica (Da Silveira *et. al*, 2024; Fernandes *et. al*, 2011).

No campo da construção civil, uma das abordagens é a incorporação desses resíduos aos materiais cimentícios na forma de fibras como potenciais substitutos para fibras artificiais, conforme destacam Ahmad e Zhou (2022) e Alshaya (2018).

A literatura reporta vasta quantidade de estudos sobre as propriedades de materiais cimentícios reforçados com diferentes tipos de fibras naturais, como as fibras de coco (Awoyera, *et. al*, 2022; Thanushan e Sathiparan, 2022), de sisal (Priyadharshini e Ramakrishna, 2018), de banana (Thanushan e Sathiparan, 2022), de Cana-de-açúcar (De Pellegrin, Acordi e Montedo, 2019), de curauá (De Azevedo *et. al*, 2020), de açaí (De Azevedo *et. al*, 2021), de guarumã (Azevedo *et. al*, 2022; Santo de Lima *et. al*, 2024), de palha do milho (De Aquino *et. al*, 2020). Em comum, essas pesquisas mostram a possibilidade do uso de fibras como reforço em materiais cimentícios como as argamassas, contribuindo para melhorar suas propriedades, no entanto, ressaltam que a aplicação das fibras para este fim encontra limitações associadas à heterogeneidade, alta hidrofiliabilidade e instabilidade da fibra quando submetida ao ambiente alcalino gerado pela matriz cimentícia,

propriedades que podem comprometer durabilidade e desempenho dos compósitos produzidos.

Neste sentido, Ali *et. al* (2022) e Khan, Reehman e Ali (2020) corroboram com a importância de estudos sobre os tipos de fibras disponíveis na natureza e o desenvolvimento de tratamentos visando incorporá-los à esses materiais

A Carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma palmeira nativa da região Nordeste do Brasil, conhecida pela resistência às condições climáticas do semiárido e por ser um importante recurso econômico para agricultores extrativistas no período de seca (Da Silva *et. al*, 2018). Seu produto de maior valor comercial é a cera retirada de suas folhas, conhecida internacionalmente como “cera de carnaúba” (Da Silva *et. al*, 2018), obtida após um processo de beneficiamento do material. Após a retirada da cera, ocorre a geração da palha, material fibroso proveniente da folha, tradicionalmente utilizado para a confecção de produtos artesanais como vassouras, escovas, cestos, cobertura de casas ou ainda descartado na natureza, tornando-se um problema ambiental (PNUD, 2012).

Diversos estudos têm se dedicado a investigar as diversas aplicações das fibras de carnaúba, como a produção de biocombustível (Lima *et. al*, 2019; Da Silva *et. al*, 2018; Bezerra *et. al*, 2024), de fertilizantes (Da Silva *et. al*, 2022) e como material de reforço de compósitos de matriz polimérica (Melo *et. al*, 2012, Junior *et. al*, 2020). No entanto, a aplicação das fibras de carnaúba em materiais de construção civil, especialmente em compostos à base de cimento, ainda é pouco explorada.

Portanto, este trabalho visa contribuir para o avanço dos estudos relacionados à aplicação de fibras naturais em materiais cimentícios aliada ao aproveitamento de resíduos oriundos da atividade agroindustrial através da avaliação do potencial de uso da fibra da carnaúba em argamassas de revestimento a base de cimento para construção civil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o efeito da adição de fibras de carnaúba como material de reforço de argamassas de revestimento a base de cimento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

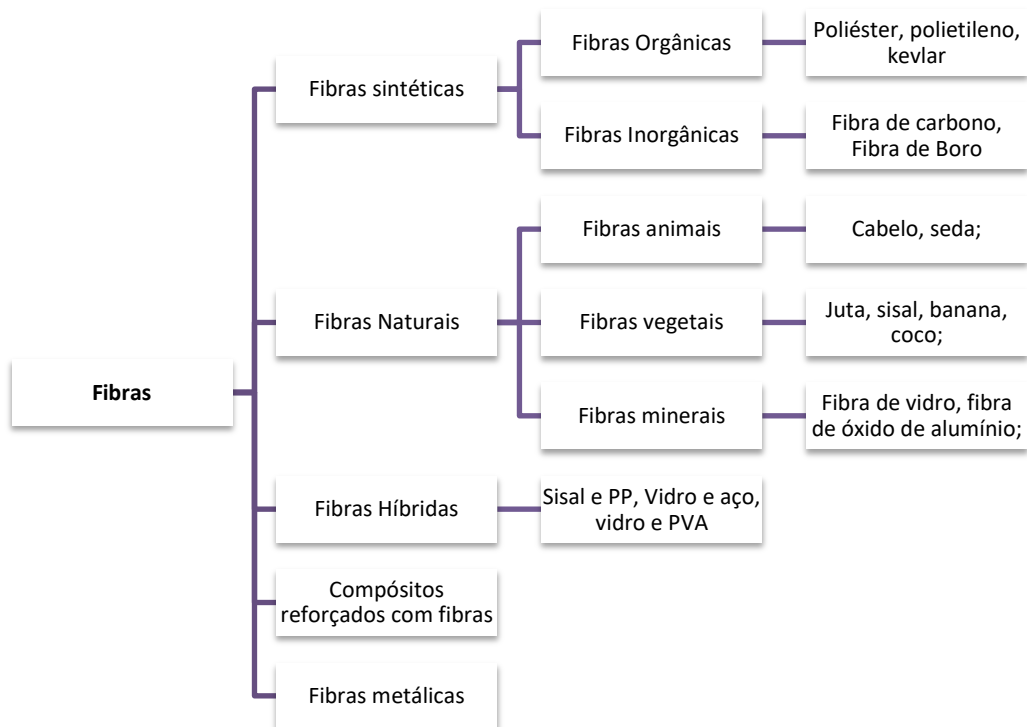
- i. Analisar a influência da realização do tratamento alcalino com solução de  $\text{CaOH}_2$  nas propriedades físicas, mecânicas, químicas e estruturais da fibra de carnaúba;
- ii. Analisar a influência da aplicação do tratamento alcalino no comportamento térmico das fibras de carnaúba;
- iii. Analisar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido das argamassas reforçadas com fibras de carnaúba nas condições natural e submetidas ao tratamento alcalino.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Fibras

As fibras são classificadas de acordo com a origem do seu material constituinte em dois grandes grupos: fibras naturais e sintéticas (Wani e Ganesh, 2022; Ahmad e Zhou, 2022), esses materiais ainda podem ser utilizados de forma combinada (Cao e Zhang, 2018), a Figura 1 apresenta um esquema com as principais formas de classificação das fibras.

**Figura 1 - Classificação das Fibras**



**Fonte:** Adaptado de Wani e Ganesh (2022)

##### 3.1.1 Fibras sintéticas e Fibras Naturais

Conforme explicam Wani e Ganesh (2022), as fibras sintéticas são de origem artificial e podem ser classificadas como orgânicas ou inorgânicas.

Uma ampla variedade de materiais sintéticos é utilizada como matéria prima na produção de fibras, ZHAO *et. al* (2023) destacam que materiais sintéticos mais

utilizados na produção das fibras são o aço, basalto, vidro, carbono, polipropileno, álcool polivinílico, poliácridonitrila, polietileno, nylon, de acordo com os autores, na avaliação as propriedades das fibras para utilização como material de reforço em compósitos são: densidade relativa, resistência à tração, módulo de elasticidade, diâmetro, alongamento final, temperatura de operação.

Para os materiais cimentícios, conforme destacam Ali *et. al* (2022), as fibras mais utilizadas são as de aço, usadas por suas propriedades de alta resistência à tração, resistência à flexão e conseguir melhora na tenacidade do compósito cimentício; e as fibras de polipropileno, que contribuem para melhorar a durabilidade e tenacidade do material.

As fibras naturais é uma nova categoria de materiais de engenharia de origem natural (Wani e Ganesh, 2022) e podem ser classificadas quanto à matéria-prima que as constituem como: fibra animal, mineral ou vegetal (Ahmad e Zhou, 2022).

Comparando os dois materiais, Ali *et. al* (2022) destacam que as fibras sintéticas convencionais são mais caras, especialmente quando necessitam ser importadas de outros países, corroborando, Vivek e Prabalini (2021) explicam que as fibras naturais apresentam como vantagens o custo inferior e a possibilidade de serem obtidas localmente, além de serem renováveis, reutilizáveis e biodegradáveis.

### **3.1.2 Fibras Vegetais**

A ampla diversidade de fibras vegetais disponíveis em várias partes do mundo tem contribuído para o avanço das pesquisas visando o aproveitamento como material de engenharia, podem ser aplicadas como material de reforço em compósitos de matrizes cerâmicas (Thanushan e Sathiparan, 2022), biocompósitos (Melo *et. al*, 2012), polímeros (Junior *et. al*, 2020) e compósitos cimentícios (Alshaya *et. al*, 2018).

De acordo com Vivek e Prabalini (2021) as fibras vegetais mais utilizadas para aplicações em materiais compósitos são fibra de juta, algodão, coco, linho, sisal e bananeira.

Segundo Alshaya *et. al* (2018) um dos fatores que afetam as propriedades das fibras é a parte da planta da qual são extraídas, podendo ser categorizadas

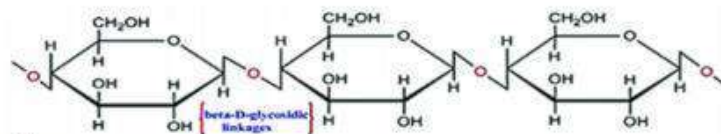
quanto a esse aspecto como caule (milho, cana-de-açúcar); folha (abacaxi e sisal); semente (coco e algodão), grama e fibra da madeira.

Os principais constituintes das fibras vegetais são a celulose, hemicelulose e a lignina, são macromoléculas arranjadas entre si presentes na parede celular das plantas (Fornari 2017).

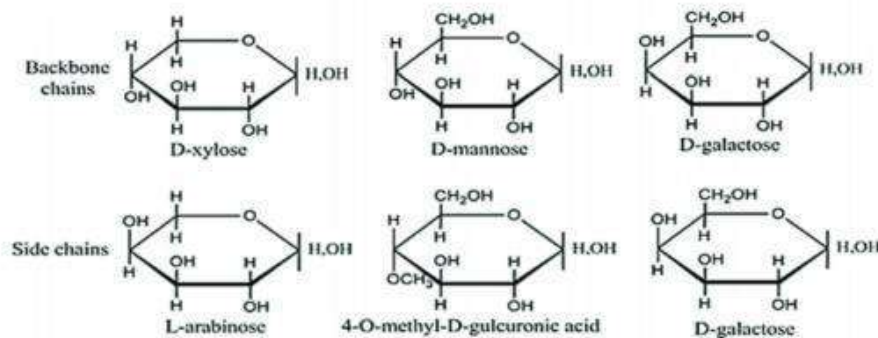
A Figura 2 descreve a estrutura química dos principais componentes encontrados nas fibras vegetais.

**Figura 2 -** Estrutura química dos principais constituintes das fibras vegetais

**(a) Cellulose**



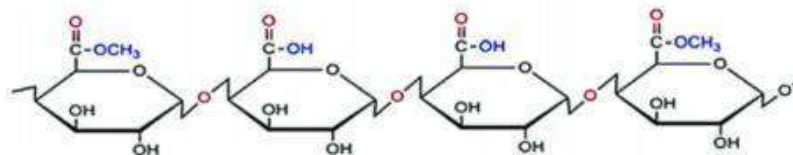
**(b) Hemicellulose**



**(c) Phenols in Lignin**



**(d) Pectin**



Fonte: Adaptado de Ahmad e Zhou (2022)

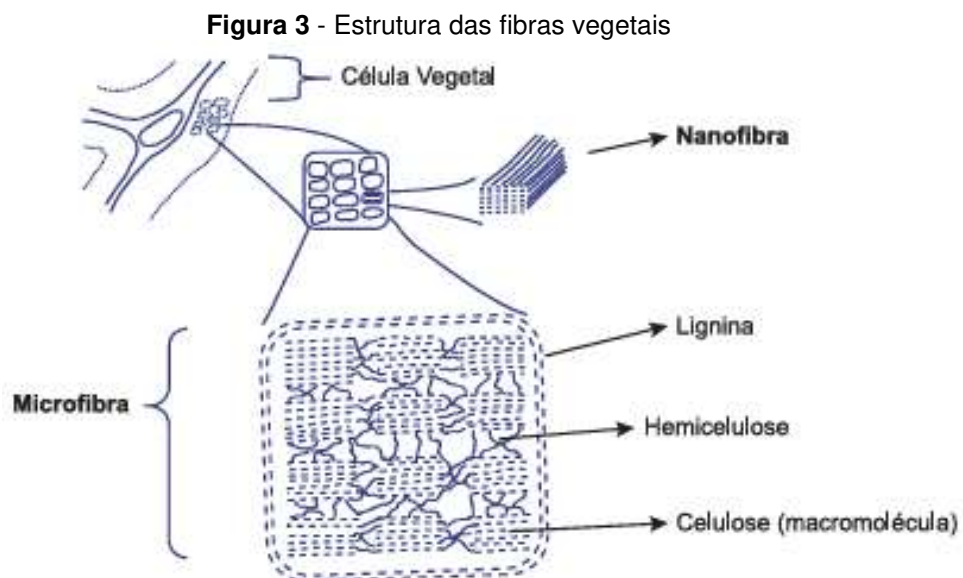
A celulose é um polímero natural de cadeia longa, definido quimicamente como a união de monômeros de glicose unidos por ligações  $\beta$  1,4 glicosídicas (Fornari, 2017), encontrada na forma cristalina e na forma amorfa, com locais de alta e baixa ordem, é resistente a álcalis fortes e agentes oxidantes e redutores, segundo Ahmad e Zhou (2022), é vulnerável à hidrólise com ácido para produzir açúcares

solúveis em água e biodegradáveis quando submetida a tratamento químico e em solução.

Diferente da celulose que apresenta unidade repetitiva de glicose, segundo Fornari (2017) a hemicelulose é um polímero altamente ramificado de caráter amorfo, constituído por diferentes tipos de sacarídeos, capaz de formar ligações de hidrogênio com a celulose, ligações covalentes com a lignina e ligações éster com unidades acetil e ácido hidroxi-cinâmico.

A estrutura da lignina, conforme descrito por Fornari (2017) é caracterizada como uma macromolécula polifenólica amorfa e altamente ramificada, arranjada tridimensionalmente em três principais unidades: p-hidroxifenila, siringila e guaiacila, que podem ser ligadas à cadeia alifática de três carbonos formando as unidades p-hidroxifenil propano, sirigilpropano e guaicilpropano.

Quanto ao arranjo dos constituintes na fibra, segundo Da Silveira et. al (2024) a celulose está presente nas fibras vegetais na forma de fibrilas incorporadas a uma matriz amorfa da hemicelulose, responsável por promover a ligação das fibrilas e de lignina, que protege o conjunto. Segundo Fornari (2017) as macromoléculas de celulose formam ligações entre si formando nanofibras, a hemicelulose atua na ligação entre essas unidades dando origem às microfibras, uma estrutura maior e macroscopicamente mais volumosa, a lignina atua envolvendo o conjunto, a soma destas estruturas forma as fibras vegetais propriamente ditas, o esquema de formação das fibras vegetais está mostrado na Figura 3.



Fonte: Fornari (2017)

Quanto ao papel desempenhado por esses componentes nas propriedades da fibra, Da Silveira *et. al* (2024), indicam que o maior teor de celulose está associado ao acréscimo da resistência à tração e módulo de elasticidade, o ângulo de microfibrila determina a rigidez, enquanto o aumento nos teores de lignina e hemicelulose contribuem para o aumento da absorção de água.

### **3.2 Compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras vegetais**

Materiais cimentícios, como argamassas e concretos, apresentam problemas relacionados à baixa resistência à tração, baixa tenacidade e retração, que ocorre após perda de água interna, evaporação ou consumo decorrente das reações de hidratação do cimento Portland (Ahmad e Zhou, 2022)

Uma das alternativas utilizadas para melhorar essas propriedades é a adição de fibras, incorporadas com o objetivo de melhorar a ductilidade, tenacidade e flexibilidade (Thanushan e Sathiparan, 2022) e as propriedades mecânicas de resistência à tração e flexão (Surnam e Imrith, 2023; Mathavan, Sakthieswaran e Babu, 2021), as fibras contribuem para melhorar essas propriedades pois são capazes de transpor a trinca de maneira mais apropriada que a matriz simples, conforme DE OLIVEIRA LIBÓRIO DOURADO *et al* (2023) explicam, as fibras atuam como pontes nas fissuras e induzindo a transferência de cargas tanto em fissuras de compressão quanto em ensaios de tração indireta. .

No estudo da adição de fibras aos compósitos cimentícios um aspecto importante é a análise da influência das propriedades das misturas no estado fresco, conforme destaca Da Silva *et. al* (2023) a análise de parâmetros reológicos e de hidratação é um indicador relevante para identificar alterações nas propriedades e no desempenho mecânico no estado fresco de materiais cimentícios, uma vez que tais parâmetros interferem fortemente na interação fibra-matriz.

Priyadharshini e Ramakrishna (2018) destacam que não há ensaios unificados que permitam conhecer o comportamento das argamassas em seu estado fresco.

Quanto a esse aspecto, verifica-se que a adição de fibras atua reduzindo a fluidez e trabalhabilidade da argamassa, conforme observado nos estudos sobre diferentes tipos de fibra, como as fibras de açaí (Azevedo *et. al*, 2021), fibras de sisal (Priyadharshini e Ramakrishna, 2018) e fibras de coco (Awoyera, Paul O. *et al*,

2022), segundo os autores isso ocorreu porque a adição das fibras contribuiu para melhorar a estabilidade da mistura.

Quanto às propriedades mecânicas, conforme Ali *et. al* (2022) a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras são geralmente superiores aos da matriz simples, a adição de fibras é capaz de melhorar substancialmente a resistência à tração dos compósitos cimentícios, contribui para o aumento da tenacidade de compósitos cimentícios tanto à compressão quanto à tração.

### **3.2.1 Durabilidade dos compósitos reforçados com fibra vegetais**

Um dos obstáculos para o uso de fibras vegetais com material de reforço em compósitos de matriz cimentícia se deve à incompatibilidade química dos dois materiais, neles a ligação química entre a fibra e a matriz ocorre principalmente devido à força de Van der Waals e interações dos grupos hidroxila da celulose e hidróxido de cálcio presente na matriz (Ferreira *et. al*, 2015).

Nesse contexto, Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria (2023), citam duas possíveis estratégias, a alteração da composição da matriz visando reduzir a alcalinidade ou modificação prévia da fibra natural através de processos químicos ou físicos com o objetivo de melhorar a sua estabilidade.

A alta hidrofiliabilidade das fibras também contribui para o enfraquecimento da adesão da fibra com matriz, o processo de interação ocorre como descrito por Ali *et. al* (2022) no estudo sobre compósitos cimentícios reforçados com fibra de coco, segundo os autores, devido à natureza hidrofílica, ainda no estado fresco, os filamentos absorvem água da mistura, após a secagem, a fibra perde umidade para o meio e encolhe, deixando um espaço vazio entre a pasta de cimento e o filamento, o que pode aumentar a porosidade permeável afetando negativamente a durabilidade, a perda na força de adesão também pode diminuir a eficiência da fibra, contribuindo para redução da ductilidade e tenacidade do compósito.

### **3.3 Tratamentos nas fibras vegetais para aplicação em materiais cimentícios**

A degradação da fibra natural devido ao caráter alcalino da solução na matriz de cimento diminui a durabilidade (Ferreira *et. al*, 2011), isso pode causar falha prematura do compósito, uma das soluções para o problema consiste na aplicação

métodos de pré-tratamentos que alteram a fibra visando melhorar a compatibilidade com a matriz cimentícia.

Os métodos de tratamento aplicados às fibras vegetais atuam modificando a estrutura física e a composição química, principalmente alterando as cadeias de celulose, removendo lignina ou hemicelulose, ou induzindo ambas as alterações simultaneamente (Da Silva *et. al*, 2018), conforme apresentado nas subseções seguintes.

### **3.3.1.1 Hornificação**

Trata-se de um tipo de tratamento baseado no enrijecimento da estrutura polimérica presente nos materiais lignocelulósicos. Segundo Ferreira *et. al* (2015), consiste na aplicação de ciclos de molhagem e secagem da fibra com o objetivo de reduzir a hidrofiliabilidade, de acordo com os autores a modificação da microestrutura promovida resulta na estabilidade dimensional da fibra.

### **3.3.1.2 Mercerização**

Segundo, Rahman e Khan (2007) a mercerização trata-se de um método de tratamento alcalino de fibras celulósicas, é utilizado na produção de fibras de alta qualidade que contribui para o aumento da adesão fibra-matriz através da remoção de impurezas da superfície das fibras e da alteração da estrutura cristalina da celulose, conforme observado por Fernandes *et. al* (2011).

Segundo Kim e Netravali (2010) o tratamento por mercerização atua na remoção da hemicelulose e da lignina nas fibras vegetais aumentando o teor de celulose e da cristalinidade do material, contribuindo para o acréscimo nas propriedades de resistência à tração da fibra.

No estudo De Azevedo *et. al* (2020) sobre a aplicação de fibras de curauá em argamassas para revestimento, os autores verificaram que o tratamento alcalino aplicado às fibras de curauá alterou propriedades promovendo o aumento da densidade específica, redução da hidrofiliabilidade e aumento da resistência a tração e do módulo de elasticidade da fibra, que contribuíram para a sua aplicação em compósitos cimentícios.

### 3.3.1.3 Impregnação com Sílica Ativa

As partículas de sílica ativa atuam como enchimentos dentro da matriz cimentícia, reduzem a porosidade do compósito preenchendo vazios e promovendo a adesão da fibra à matriz (Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria, 2023)

## 3.4 Fibra de Carnaúba (*Copernicia Prunifera*)

A carnaúba é uma palmeira xerófita da família das *Palmae*, o nome científico da espécie originária do Brasil é *Copernicia prunifera* existente em abundância na região Nordeste (De Almeilda *et. al*, 2021), seus produtos florestais não madeireiros se inserem como cera e fibras (Guimarães *et. al*, 2018).

Segundo Queiroga *et. al* (2017) a palmeira carnaúba é bastante resistente e se adapta muito bem às condições de seca e enchente severas, a árvore possui folhas verdes opacas, encontradas na copa da planta, dispostas em espiral ao redor do caule.

Devido aos muitos usos e valor para a população local, a carnaúba é popularmente conhecida como a “Árvore da Vida”, com relação ao aproveitamento dos seus componentes, a PNUD (2012) destaca que seu fruto é comestível, a madeira amplamente utilizada na construção e o pó produzido por suas folhas para se proteger da desidratação é aproveitado por diversos setores industriais na produção de uma cera que está entre as mais raras que ocorrem naturalmente no mundo, constituindo seu principal produto, sua produção ocorre principalmente entre os meses de julho e dezembro (De Almeilda *et. al*, 2021)

A cera da carnaúba caracteriza-se por ser dura e quebradiça, com temperatura de fusão entre 80 e 87° (Guimarães *et. al*, 2018), entre os produtos extraídos da árvore é o de principal valor econômico. Segundo Da Silveira *et. al* (2024) a cera é utilizada em aplicações como a fabricação de lubrificantes e agentes anticorrosivos, Junio *et. al* (2020) destacam que as propriedades hipoalergênicas e emolientes da cera de carnaúba justificam seu uso em cosméticos e até mesmo em coberturas de doces.

O processo de extração da cera ocorre conforme descrito por Guimarães *et. al* (2018), após a coleta, as folhas da carnaúba são secas e batidas para o

desprendimento do pó, que é cozido, coado e resfriado para obtenção da cera bruta, o beneficiamento proporciona seu aproveitamento industrial, após a retirada do pó as folhas são desfibriladas para aproveitamento da palha na forma de fibras.

Após remoção das folhas para a retirada da cera, os talos ricos em celulose são considerados resíduos e geralmente descartados no solo ou queimados (Junio *et. al*, 2020), quanto ao total de resíduo gerado, Lima *et. al* (2019), estimam que são necessárias 1000 folhas para produzir 7,8 kg de pó de cera, que considerando a demanda pela cera, resultam em aproximadamente 352.210 toneladas por ano de resíduo lignocelulósico, essas informações reforçam a necessidade do desenvolvimento de pesquisas sobre o aproveitamento adequado da palha da carnaúba.

### 3.4.1 Pesquisas de aplicação da fibra de carnaúba

A literatura reporta estudos dedicados ao desenvolvimento de aplicações visando o aproveitamento das fibras carnaúba conforme detalhado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Pesquisas sobre aplicações das fibras de carnaúba**

Nº	ESTUDO	RESUMO DO ESTUDO
01	Melo <i>et. al</i> (2012)	Fibras obtidas das folhas da carnaúba foram modificadas quimicamente visando avaliar seu potencial para o desenvolvimento de um compósito biodegradável a base de PHB. As fibras foram caracterizadas sob os aspectos físicos e mecânicos e submetidas três tipos de pré-tratamentos com objetivo de identificar o mais eficiente na promoção de uma melhor adesão com a matriz. Para o teor de 10% de fibras incorporadas ao polímero, os resultados mostraram a eficiência do pré-tratamento alcalino aplicado e a viabilidade no uso das fibras de carnaúba, por possibilitar uma redução nos custos preservando propriedades mecânicas similares ao polímero puro.
02	Da Silva <i>et. al</i> (2018)	Investigaram o potencial uso da fibra de carnaúba para produção de bioetanol por processo de sacarificação e fermentação simultânea após a aplicação de diferentes tratamentos, os resultados do estudo mostraram que a fibra da carnaúba apresenta um alto teor de celulose comprovando a viabilidade da sua utilização para a aplicação proposta.

- 
- 03** Da Silva *et. al* (2018) Estudo do efeito do pré-tratamento aplicado no resíduo da palha de carnaúba e o uso da palha tratada para a produção de enzimas lignocelulósicas no estado de fermentação sólida. Foram desenvolvidos os tratamentos hidrotérmico, alcalino, ácido-alcalino e alcalino com peróxido de hidrogênio e caracterização dos produtos através de análise composicional, identificação dos grupos funcionais presente por FTIR, determinação índice de cristalinidade da fibra por DRX e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados dos ensaios permitiram verificar o efeito dos tratamentos realizados na capacidade de produção de enzimas pelas fibras, o pré-tratamento alterou as características físicas e químicas da fibra, sendo o tratamento com peróxido de hidrogênio o mais eficiente na remoção da lignina e da hemicelulose, revelando-se um processo promissor para a produção de enzimas lignocelulósicas a partir das fibras de carnaúba.
- 04** Lima *et. al* (2019) Caracterização da palha e do talo *in natura* da fibra de carnaúba e pós-densificação através da fabricação de briquetes visando investigar a possível aplicação como matéria prima na produção de biocombustíveis. Foi realizada a análise elementar, análise imediata para determinação do teor de umidade, voláteis e carbono fixo e determinação do teor de cinzas, foi determinado o poder calorífico, densidade aparente e densidade a granel, ensaio de compressão diametral e resistência ao impacto e análise termogravimétrica dos briquetes. Os resultados indicaram a viabilidade do uso dos materiais para produção de biocombustíveis.
- 06** Junio *et. al* (2020) Desenvolvimento de compósito de matriz polimérica a base de epóxi reforçado com 40% em volume da fibra da carnaúba. Investigou a influência do teor de fibras adicionadas nas propriedades de resistência à tração, resistência ao impacto pelo método de Izod e resistência interfacial da matriz/fibra através de testes de arrancamento. Os resultados indicaram que os compósitos de epóxi reforçados com fibra de carnaúba mostraram melhor resistência à tração que o material constituído de epóxi puro, caracterizando o efeito do reforço, também houve tendência no aumento do módulo de elasticidade devido à alta tenacidade da fibra de carnaúba. De acordo com os resultados de desempenho térmico e mecânico dos compósitos produzidos os autores consideraram viável a utilização da fibra de carnaúba como reforço
-

---

		para matrizes epoxídicas em substituição à fibra de vidro comumente usada.
07	Da Silva (2022)	Produção de complexos enzimáticos de celulases e xylanases utilizando resíduo de carnaúba como fonte de carbono. A biomassa foi analisada quimicamente para determinação dos teores de seus componentes através do protocolo NREL, a análise morfológica foi feita por MEV, a cristalinidade do material foi avaliada por DRX, com os resultados da análise química foram determinadas a porcentagem de remoção de cada componente após o tratamento. Os resultados demonstraram o potencial de reaproveitamento das fibras oriundas do resíduo da carnaúba para produção da celulase e xilanase, a fim de melhorar a produção enzimática, bem como permitir redução de custos e impactos ambientais em seu processo.
08	Pereira, <i>et. al</i> (2021)	Análise da valorização da palha de carnaúba e folha de cajueiro para utilização como bioadsorventes para remoção de íons cobre (II) de solução aquosa. Os resultados indicaram que a palha da carnaúba tem potencial promissor para serem usados como bioadsorventes de íons cobre (II) na recuperação de águas residuais.
09	Eduardo, Nóbrega e Ferreira (2021)	Análise do comportamento de argamassas com adição de fibras da palha de carnaúba no estado fresco e endurecido. Foram produzidas argamassas de cimento e areia na proporção de 1:3 com adição de 3% e 5% de fibra da palha da carnaúba (FPC) em relação à massa do cimento, utilizando relação água/cimento de 0,72. Também foi avaliado o comportamento das argamassas variando o comprimento fibra de 20, 40 e 60mm. Os resultados indicaram que a adição das fibras resulta em argamassas com menor consistência e menor resistência mecânicas á compressão. A análise dos resultados foi feita por comparação direta e o melhor desempenho foi obtido para adições de até 3% utilizando fibras de 20mm.

---

A análise da literatura sobre as aplicações da fibra de carnaúba evidencia que ainda não existem estudos aprofundados sobre a utilização de fibras de carnaúba como material de reforço de compósitos de matriz cimentícia, representando uma lacuna de pesquisas sobre esse tipo de material.

### 3.4.2 Propriedades da fibra de carnaúba.

Um dos primeiros estudos relacionados às propriedades da fibra de Carnaúba foi desenvolvido por Fernandes *et. al* (2011), os autores estudaram a influência dos tratamentos químicos nas propriedades mecânicas, térmicas e de absorção da fibra.

A Tabela 2 apresenta a composição química da fibra de carnaúba não tratada obtida nos estudos de Junio *et. al* (2022) e Melo *et. al* (2012) e Da Silva *et. al* (2018), não foi possível identificar nos trabalhos analisados aspectos relacionados à preparação das amostra o que dificulta a comparação e análise da variação verificada para os resultados apresentados.

**Tabela 2** - Composição química da fibra de carnaúba não tratada

<b>Componente</b>	<b>Melo <i>et. al</i> (2012)</b>	<b>Da Silva <i>et. al</i> (2018)</b>	<b>Junio <i>et. al</i> (2022)</b>
Cera	-	11,62%	4,8%
Cinzas	1,80%	7,69%	2,2%
Lignina	19,03%	32,79	36,9%
Hemicelulose	14,02%	11,84%	40,9%
Celulose	58,04%	23,96%	20,2%
Umidade	7,53%	-	7,2%
Outros	-	12,10%	-

As fibras de Carnaúba foram caracterizadas sob aspectos estruturais, térmicos e mecânicos por Junio *et. al* (2022), segundo os autores, a existência de poucos estudos relacionados é um fator limitante para o aumento de sua empregabilidade em aplicações de engenharia e consideram a quantificação de constituintes químicos apresentada por fibras de carnaúba necessária para a determinação de suas propriedades.

A análise da morfologia da fibra desenvolvida no estudo de Junio *et. al* (2022) identificou uma seção de fibra de formato elíptico. Os autores correlacionaram a redução da densidade ao aumento do diâmetro das fibras analisadas, explicada pelos vazios observados no interior da fibra, canais responsáveis pela transferência de nutrientes ao longo da estrutura do seu eixo longitudinal, observados nas micrografias de seção transversal das fibras obtidas através dos ensaios de MEV, as análises também revelaram a presença de diversos defeitos superficiais nas fibras, como porosidade, trincas e degradação de fibras.

A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados na literatura para as propriedades da fibra de carnaúba nas condições tratada (FT) e não tratada (FNT).

**Tabela 3 - Propriedades mecânicas da fibra de carnaúba**

Propriedades	Melo <i>et. al</i> (2012)		Junio <i>et. al</i> (2023)
	FNT	FT	FNT
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,34	1,44	1,13
Diâmetro	-	-	
Resistência à tração (MPa)	205-264	148-248	64,7
Módulo de elasticidade (GPa)	8,2-9,2	6,3-14,0	1,37
Alongamento máximo (%)	1,7-2,6%	1,7-2,6%	5,59

As propriedades físicas, mecânicas e morfológicas foram estudadas por Junio *et. al* (2023), os autores observaram a similaridade com outras fibras naturais lignocelulósicas tradicionalmente utilizadas como o bambu, sisal, piaçava e curau, indicando a possibilidade de utilização destes materiais em aplicações de reforço de materiais compósitos.

Quanto às propriedades mecânicas os resultados da pesquisa de Melo *et. al* (2012) indicaram alongamento total da fibra entre 1,7 e 2,6%, resistência à tração de 205 a 264MPa e módulo de elasticidade de 8,2 e 9,2 GPa, baseado nesses dados, Junio *et. al* (2020) verificaram que os resultados das propriedades mecânicas das fibras de carnaúba se equiparam a outras fibras naturais lignocelulósicas como o coco, bambu e piaçava.

Comparando as fibras de carnaúba a outros materiais de base lignocelulósica, Fernandes *et. al* (2011) observaram que os resultados referentes às suas propriedades mecânicas se assemelham aos resultados obtidos para algodão e sisal em termos de módulo de elasticidade e ao sisal e linho em termos de resistência à tração.

No estudo das propriedades térmicas elaborado por Junio *et. al* (2022), a análise termogravimétrica das fibras de carnaúba indicaram perda de massa significativa em dois patamares, o primeiro em 64°C atribuída à perda da umidade e o segundo ocorrendo em 207°C e 414°C, relacionado a eventos de degradação de constituintes lignocelulósicos presentes na estrutura da fibra.

Em outro estudo, Junio *et. al* (2020) identificaram que a perda de massa total aos 200°C foi 9,63%, verificaram também que temperaturas inicial e final de degradação da fibra de carnaúba em 267° e 326°C, e perda de massa de 63,1% ao término do segundo estágio.

A análise termogravimétrica desenvolvida por Melo *et. al* (2012), mostrou uma perda de massa entre 30 e 130°C atribuída à perda de umidade e vaporização de resíduos sólidos nas fibras, acima dessa temperatura a fibra perde estabilidade térmica, a degradação térmica ocorre inicialmente no estágio de 240-280°C, associada à despolimerização da hemicelulose e destruição de regiões cristalinas, onde a perda de massa é cerca de 50%, no estágio entre 380 e 530°C ocorre à decomposição final.

### **3.4.3 Tratamento da fibra de carnaúba**

Diversos estudos analisaram a influência dos tratamentos nas propriedades da fibra de carnaúba, o efeito do tratamento é avaliado através da comparação dos resultados com os parâmetros da fibra *in natura*.

Um dos primeiros estudos encontrados na literatura sobre a fibra de carnaúba é o material desenvolvido por Fernandes *et. al* (2011), os autores realizaram a caracterização das fibras quanto à estabilidade térmica, hidrofiliabilidade e resistência mecânica, avaliando o efeito da aplicação de diferentes tratamentos nas propriedades da fibra. Os tipos de tratamento utilizados foram o tratamento alcalino com NaOH, com tetracloreto de carbono e ciclohexano, escolhidos tomando como referência outras pesquisas com fibras lignocelulósicas. Para análise do efeito dos tratamentos na morfologia das fibras os autores utilizaram ensaios de MEV e observaram que o tratamento com solventes (hexano e tetracloreto de carbono) produziram as mudanças mais significativas na superfície da fibra quando comparadas ao tratamento alcalino, por atuarem removendo a camada de cera de carnaúba. O estudo também avaliou a alteração na capacidade de absorção de água pela fibra, os resultados indicaram que em comum, os tratamentos não alteraram a quantidade de água total absorvida pela fibra, entretanto, contribuíram para tornar o processo de absorção mais rápido. Quanto às alterações na estrutura química das fibras, foi feita a análise termogravimétrica da fibra para cada tratamento aplicado, os resultados indicaram que o tratamento alcalino alterou a

estrutura cristalina da celulose, enquanto o tratamento com solventes atuaram apenas na remoção da camada de cera da superfície.

No estudo de Melo *et. al* (2012), as fibras obtidas das folhas da carnaúba foram modificadas visando avaliar seu potencial para o desenvolvimento de um compósito biodegradável a base de PHB. A aplicação dos tratamentos propostos para as fibras tinham o objetivo de melhorar a adesão interfacial entre a fibra e a matriz de PHB. Foram analisados os pré-tratamentos alcalino, com peróxido, permanganato de potássio e acetilação. Para análise dos resultados foram realizados ensaios de MEV, as imagens obtidas mostraram que todos os pré-tratamentos aplicados foram eficientes para a remoção da cera depositada na superfície da fibra, os resultados evidenciaram a efetividade do tratamento alcalino, porém indicaram que concentrações maiores de NaOH poderiam ser deletérios por promoverem a degradação superficial da fibra. O tratamento com peróxido contribuiu para a remoção da cera, mantendo a rugosidade da fibra, contribuindo para uma melhor adesão da fibra-matriz e por consequência das propriedades mecânicas dos compósitos. Todos os tratamentos também contribuíram para o acréscimo na densidade da fibra, os autores explicam que eles atuam tornando a estrutura celular mais compacta com a redução dos teores de vazios na fibra. Quanto aos ensaios mecânicos, os resultados mostraram que a resistência à tração das fibras de carnaúba tratadas em geral foi menor do que a das fibras não tratadas. Para fibras tratadas com peróxido, a resistência foi semelhante à das fibras não tratadas. As fibras tratadas com acetilação e permanganato apresentaram as menores resistências. Neste caso, o tratamento pode ter afetado a celulose, que entre os seus componentes, é o principal responsável por conferir resistência mecânica à fibra. A deformação por tensão até a falha das fibras ficou em torno 2% para todos os tratamentos aplicados. O módulo de elasticidade aumentou para o tratamento alcalino e com peróxido

A pesquisa de Da Silva *et. al.* (2018), avaliou a eficiência de três métodos de pré-tratamentos das fibras, aplicados visando verificar de que modo às alterações provocadas eram capazes de contribuir para o processo de hidrólise enzimática para fabricação de etanol. Os tratamentos realizados foram o hidrotérmico, tratamento alcalino e tratamento ácido-alcalino. No tratamento hidrotérmico uma mistura de água e resíduo de carnaúba foi aquecida até 121°C por 30min e então lavada até atingir PH neutro. Para o tratamento alcalino foi preparada uma solução de 4,0% em

massa de NaOH também aquecida a 121°C por 30min e lavada para atingir PH neutro e tratamento ácido-alcalino, inicialmente seguiu o mesmo procedimento do tratamento alcalino, seguido pela submersão das fibras em solução de 2,0% em massa de ácido sulfúrico e depois lavadas até atingir o PH neutro. Os resultados mostraram que os três processos provocaram alterações nas fibras. O tratamento alcalino apresentou maior efeito na remoção da lignina e da hemicelulose, o tratamento ácido-alcalino promoveu uma perda de 50% celulose e o tratamento hidrotérmico não se mostrou eficiente na remoção da lignina, reforçando a eficiência do tratamento alcalino no pré-tratamento de materiais lignocelulósicos e especificamente na palha da carnaúba. Os resultados da análise composicional da fibra após tratamentos indicaram também a presença de resíduos (esteroides, ácidos de gordura, pectina e polissacarídeos gerados após a realização dos tratamentos propostos), assim como fragmentos desses compostos, que por não serem extraídos por solventes orgânicos fracos se precipitaram novamente nas fibras, também foi observado um alto teor de cinzas, comum em resíduos agrícolas.

O estudo de Da Silva *et. al* (2018) avaliou a viabilidade do uso da biomassa resultante do resíduo da palha de carnaúba após a realização de tratamento hidrotérmico, alcalino, ácido-alcalino e alcalino com peróxido de hidrogênio. Na pesquisa, o objetivo dos tratamentos foi aumentar a hidrólise da biomassa visando melhorar a digestibilidade das enzimas lignocelulósicas utilizada na produção do etanol. A eficiência dos tratamentos foi avaliada comparando alteração da composição química do material, os resultados indicaram que o tratamento alcalino foi o mais eficiente na remoção simultânea da lignina e da hemicelulose, o que corrobora com o aumento do índice de cristalinidade do material observado nos ensaios de FTIR e DRX, esses resultados corroboraram com os observados por Da Silva *et. al* (2022) que aplicaram o pré-tratamento com o objetivo de melhorar a eficiência dos processos de deslignificação, foi realizado o tratamento alcalino com peróxido de hidrogênio, os resultados mostraram a eficiência do processo na remoção da lignina e da hemicelulose.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **4.1 Materiais**

#### **4.1.1 Fibra da Carnaúba**

As fibras utilizadas na pesquisa são provenientes do Município de Uruaçu no Rio Grande do Norte, obtidas através de um fornecedor local, que realizou uma preparação prévia através da retirada das folhas e prévia secagem ao sol.

#### **4.1.2 Cimento Portland**

Para produção das argamassas utilizou-se o cimento do tipo CP-IV RS da marca Poty, que consiste em um cimento Portland com adição pozolânica, escolhido por se tratar de um tipo de cimento com menor adição de clínquer na sua produção.

Para os ensaios realizados nessa pesquisa foi determinada a massa específica do cimento igual a  $3,18\text{g/cm}^3$ , conforme NBR 16605 (ABNT, 2017).

#### **4.1.3 Areia**

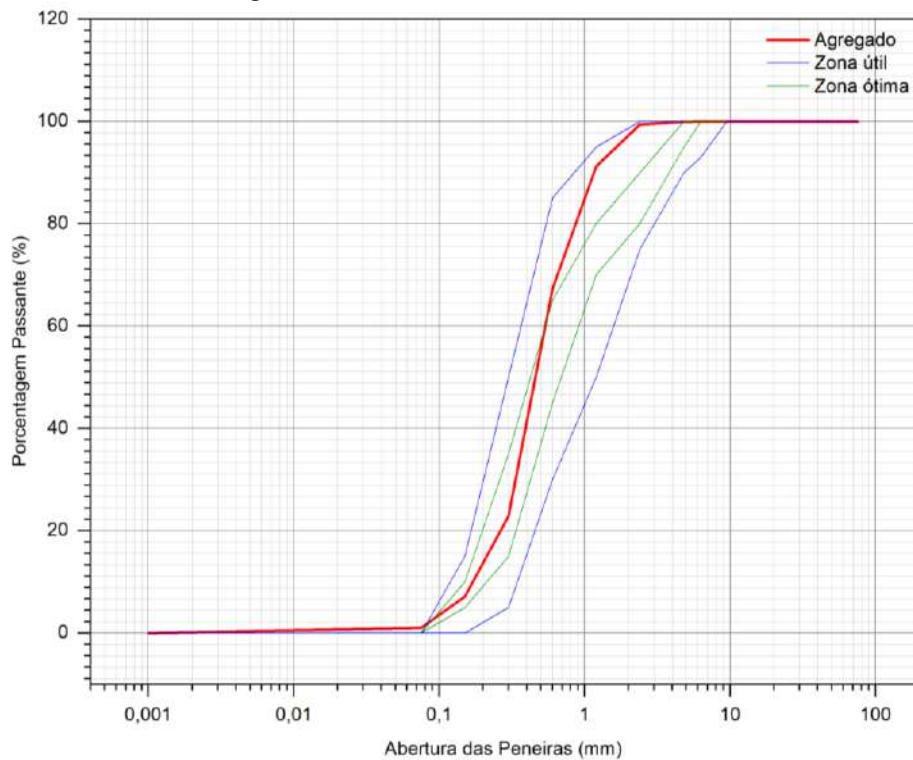
A areia utilizada foi a areia de rio com granulometria fina, peneirada e homogeneizada de acordo com os métodos estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2022).

Para sua caracterização foi realizado o ensaio de granulometria conforme NBR 17054 (ABNT, 2022), que permitiu a obtenção da sua curva granulométrica, do seu módulo de finura e da dimensão máxima do agregado, a massa específica determinada conforme NBR 16916 (ABNT, 2021) e a massa unitária conforme NBR 16972 (ABNT, 2021).

A Figura 4, apresenta a curva obtida a partir do ensaio de granulometria realizado conforme procedimentos determinados na NBR 17054 (ABNT, 2022), os resultados do ensaio permitiram enquadrar a areia utilizada na pesquisa na zona útil

de utilização, a partir dos dados obtidos no ensaio também foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado.

**Figura 4 - Curva Granulométrica da Areia**



A massa específica da areia foi determinada conforme NBR 16916 (ABNT, 2021) e a massa unitária igual determinada conforme NBR 16972 (ABNT, 2021).

Os resultados dos ensaios de caracterização física da areia podem ser encontrados na Tabela 4.

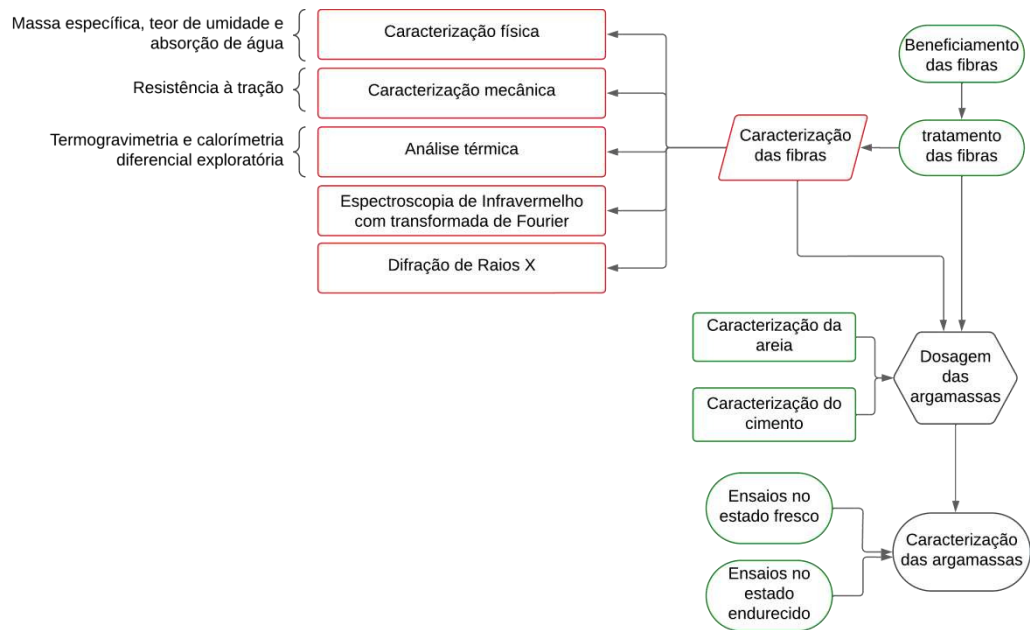
**Tabela 4 - Caracterização física da areia**

Propriedades	Norma	Resultados
Módulo de finura	NBR 17054 (2022)	2,12
Dimensão máxima de agregado (mm)	NBR 17054 (2022)	2,4
Massa específica (g/cm <sup>2</sup> )	NBR 16916 (2021)	2,53
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16972 (2021)	1,55

## 4.2 Métodos

As etapas que compõem a pesquisa estão identificadas no fluxograma da Figura 5, que esquematiza o programa experimental proposto.

**Figura 5 – Fluxograma do Programa Experimental**



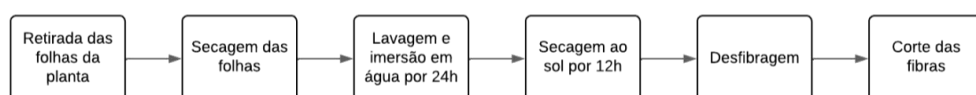
#### 4.2.1 Tratamento das fibras

O processo de beneficiamento das fibras, esquematizado na

Figura 6, foi desenvolvido com base nos procedimentos realizados por Junio *et. al* (2022). As folhas de carnaúba, conforme recebidas, foram submetidas ao processo de lavagem para remoção do excesso da cera presente na superfície, seguida por imersão em água por 24h, após esse período foi realizada a desfibragem das folhas que então colocadas para secagem ao ar livre por 12h.

O processo de desfibragem foi realizado manualmente, com o auxílio de ferramentas como facas, estiletes e tesouras, seguida pelo corte das fibras em tamanho médio de 12mm, comprimento adotado por ser a dimensão utilizada em fibras sintéticas comumente utilizadas como material de reforço em materiais cimentícios e espessura média de 700µm.

**Figura 6 – Etapas do Processo de beneficiamento das fibras de carnaúba**



Após o beneficiamento das fibras, o material foi submetido ao processo de tratamento alcalino, comumente usado em estudos sobre fibras vegetais aplicadas em materiais cimentícios (De Azevedo *et. al.*, 2021; Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria, 2023).

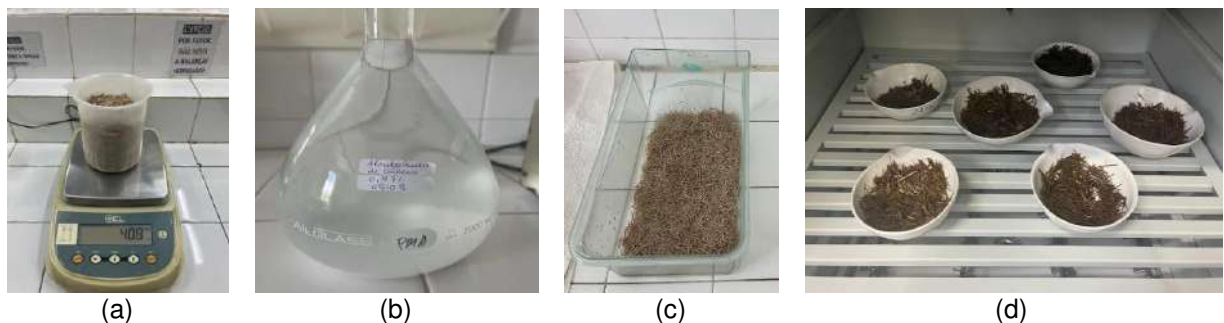
Na literatura também é possível encontrar resultados relacionados à aplicação desse tipo de tratamento em pesquisas realizadas com a fibra de carnaúba (Fernandes *et. al.*, 2011, Melo *et. al.*, 2012; Da Silva *et. al.*, 2018).

Para o presente estudo, adotou-se o processo de tratamento estabelecido por Ferreira *et. al.* (2015) em estudo sobre a durabilidade das fibras de sisal em materiais cimentícios, os autores utilizaram o tratamento alcalino por imersão em solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Para a presente pesquisa, os procedimentos foram realizados conforme etapas descritas a seguir.

As amostras foram inicialmente pesadas em uma balança com precisão de 0,1 g e imersas em uma solução com concentração de 0,73% em massa de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , utilizando um razão entre as fibras e a solução alcalina de 1:20, permanecendo nesta condição por 50 min. Após o período de imersão, as fibras foram retiradas da solução com o auxílio de uma peneira, colocadas em cápsulas de porcelana e secas em estufa a temperatura de 40°C por 48h após remoção completa da umidade superficial das amostras.

Após a secagem, as fibras foram retiradas da estufa e armazenadas em recipientes fechados, conforme ilustrado nas imagens da Figura 7.

**Figura 7** - Etapas do processo de tratamento das fibras (a) Pesagem das fibras (b) solução usada (c) recipiente com as fibras prontas para imersão (d) secagem em estufa



Verificou-se que após o tratamento as fibras adquiriram uma coloração mais escura, conforme Figura 8.

**Figura 8** - Aspecto da fibra moída em peneira com abertura 30MESH (a) antes e (b) após aplicação do tratamento



## 4.2.2 Caracterização da Fibra

### 4.2.2.1 Caracterização física da fibra

Os ensaios de caracterização foram realizados no laboratório de microbiologia do IFPB - Campus João Pessoa, os procedimentos foram realizados conforme detalhado nas seções seguintes.

#### 4.2.2.1.1 Massa específica

Para determinação da massa específica foram utilizadas fibras tamanho médio de 12 mm, previamente secas em estufa a 105°C por um período em que foi possível verificar a constância de massa, ou seja, quando não houvesse variação superior a 0,01% de massas após duas pesagens sucessivas no intervalo de 2h.

Após secagem, utilizando uma balança de alta precisão do modelo Shimadzu AU220, foram pesadas quatro amostras contendo 4,0 g de fibras e em seguida inseridas em frascos contendo 90 cm<sup>3</sup> de água, posteriormente cada conjunto foi reservado por 24 h para que o líquido preenchesse todos os vazios, eliminando a presença de bolhas. A Figura 9 ilustra as amostras utilizadas na determinação da massa específica.

**Figura 9** - Determinação da massa específica das fibras



Transcorrida a etapa anterior, foi realizada a aferição do nível da mistura no frasco para verificar o deslocamento do nível da água decorrente da inserção das fibras e posterior determinação da massa específica, conforme Eq. 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

- $\rho$  é a massa específica das fibras;
- $m$  é a massa da amostra;
- $v$  é a diferença entre o volume inicial do líquido colocado nos frascos e o volume aferido após imersão das fibras.

#### 4.2.2.1.2 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade os procedimentos foram realizados conforme especificado na Norma ASTM D2654 – 22. Duas amostras de fibras contendo 10,0 g de fibras foram pesadas em uma balança de alta precisão do Modelo Shimadzu AUY220 e colocadas em estufa a 105°C por 24h, visando verificar a constância de massa, após esse período foram feitas pesagens em intervalos de 2h, até que medidas feitas apresentassem variação inferior a 0,01%.

Verificada a constância de massa, a umidade da fibra foi determinada conforme a Eq. 2.

$$U = \frac{m_u - m_s}{m_u} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- U é o teor de umidade;
- $m_u$  é a massa da amostra úmida;
- $m_s$  é a massa da amostra seca.

#### 4.2.2.1.3 Absorção de água

Para determinar a absorção de água das fibras, três amostras contendo 2,0 g de fibras nas condições *in natura* e tratada, foram secas em estufa a 105°C até a verificação da constância de massa e, em seguida, imersas em água.

Procedendo-se então a sua pesagem depois de decorridos os tempos de 30 minutos, 24 horas e 7 dias.

O cálculo da absorção de água foi feito utilizando a Eq. 3.

$$Ab = \frac{m_{ht} - m_{st}}{m_{st}} \cdot 100 (\%) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

Ab é a absorção de água;

$m_{ht}$  é a massa úmida no tempo t;

$m_{st}$  é a massa da amostra na condição seca no início do ensaio;

#### 4.2.2.2 Análise Térmica

O ensaio termogravimetria foi realizado no laboratório de Síntese e Caracterização de Polímeros do NEPEM - Núcleo de Pesquisa de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, conforme metodologia detalhada a seguir.

Para a análise TG utilizou-se o analisador Termogravimétrico do Modelo HITACHI STA7300, amostras com cerca de 4 mg de fibras nas condições *in natura* e tratada, previamente moídas e peneiradas em peneiras com abertura de 100MESH,

foram acomodadas em cadinho de platina e escaneadas em atmosfera de gás nitrogênio a uma taxa de  $50\text{cm}^3.\text{seg}^{-1}$ , em um intervalo de temperatura de  $30^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}.\text{min}^{-1}$ .

Para o ensaio de calorimetria diferencial exploratório (DSC) utilizou-se o equipamento DISCOVERY DSC 25 DA TA INSTRUMENTS, o intervalo de temperatura adotado foi de  $30^\circ\text{C}$  a  $250^\circ\text{C}$ , com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}.\text{min}^{-1}$ , em atmosfera inerte de gás nitrogênio com taxa de  $50\text{ cm}^3.\text{seg}^{-1}$ . Foram analisadas amostras com 2,4 mg de fibras nas condições in natura e tratada acomodadas em cadinho de alumínio.

Para plotagem dos gráficos e tratamento dos dados obtidos nos ensaios foi utilizado o software Origin Pro 2024b.

#### **4.2.2.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

A análise de Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier permite a identificação da natureza das ligações químicas presentes no material, Conforme Fornari (2017), a técnica consiste em incidir radiação do espectro infravermelho em uma amostra de determinado material e quantificar a porção da energia aplicada que foi absorvida (absorbância) ou transmitida (transmitância) e relacionando-a ao tipo ligação química presente na amostra.

Nesse estudo, o ensaio foi realizado utilizando o equipamento do modelo INVENIO FT-IR SPECTROMETER BRUKER, no laboratório de síntese e caracterização de polímeros do NEPEM. Para preparação das amostras as fibras foram moídas e peneiradas em uma peneira de abertura de 100MESH, em seguida misturadas ao Brometo de Potássio (KBr) para confecção de pastilhas. As amostras preparadas foram submetidas à varredura nos comprimentos de onda de 4000 a  $450\text{ cm}^{-1}$ .

Os dados obtidos foram tratados com o software Origin Pro 2024b, gerando os respectivos espectros de transmitância (%) em função do número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ).

#### 4.2.2.4 Difração de raios-X

O ensaio de difração de raios-X foi realizado com o objetivo de determinar o índice de cristalinidade das fibras. De acordo com Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria (2023) a técnica é utilizada para identificar os minerais cristalinos nas fibras naturais quando seu teor é superior a 1%.

Nesse estudo a análise foi feita para a fibra nas duas condições estabelecidas (*in natura* e tratada) visando verificar a alteração do grau de cristalinidade do material em função do tratamento aplicado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da UFPB, utilizando um equipamento do modelo XRD6000-SHIMADZU, utilizando radiação  $K_{\alpha-Cu}$ , com voltagem de 30 kV e corrente elétrica de 30 mA, a varredura foi feita no intervalo  $2\theta$  contínuo de  $4^\circ$  a  $70^\circ$ , com uma taxa de varredura de  $2,0^\circ/\text{minuto}$ . As amostras utilizadas foram previamente moídas e peneiradas na peneira 200 mesh (abertura de 0,074 mm).

Para plotagem do difratograma no intervalo analisado foi utilizado o Software Origin Pro 2024b,

O índice de cristalinidade foi calculado de acordo com o método da altura do pico, conforme Eq. 4 proposta por Segal *et. al* (1959).

$$IC (\%) = [(I_{002} - I_{am})/I_{002}] \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

- IC expressa o índice relativo de cristalinidade;
- $I_{002}$  é a intensidade máxima da difração de rede 002 ( $2\theta = 22,6^\circ$ )
- $I_{am}$  é a intensidade de difração nas mesmas unidades em  $2\theta = 18^\circ$ .

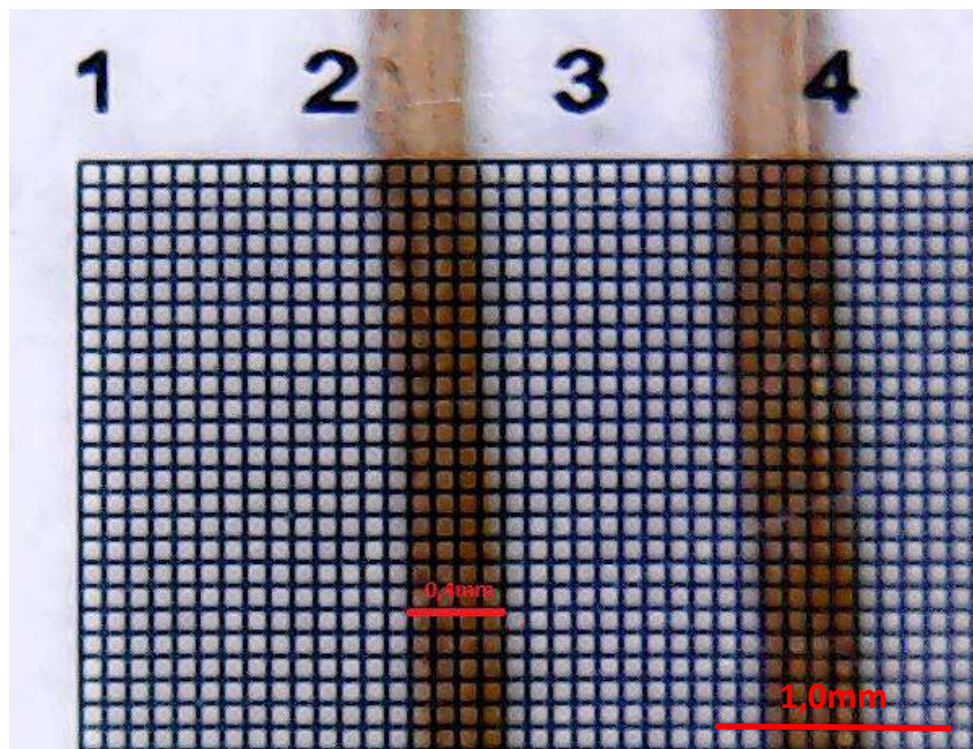
#### 4.2.2.5 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica das fibras foi feita através da determinação da resistência à tração para a fibra na condição natural e tratada, os procedimentos foram realizados em duas etapas.

Inicialmente foram selecionadas aleatoriamente 10 amostras de fibras para cada uma das condições analisadas. Escolhidas as amostras foi feita a análise de microscopia ótica da seção da fibra, nessa etapa foram adotados os procedimentos conforme Junio *et. al* (2022). Utilizando um microscópio digital de bancada com uma magnificação de 100x, foram feitas 5 medidas ao longo do comprimento da fibra nos diâmetros que formando ângulos de 0° e 90° com plano normal ao seu eixo longitudinal, a Figura 10 ilustra a medida do diâmetro de uma das amostras analisadas.

Os dados obtidos foram utilizados para determinar o diâmetro médio das fibras e a área da seção da fibra, para a sua determinação considerou-se que as fibras apresentavam formato elíptico, conforme observado em outros estudos sobre a sua morfologia (Junio *et. al*, 2022; Melo *et. al*, 2012).

**Figura 10** - Determinação do diâmetro médio das fibras



A etapa seguinte do ensaio consistiu na determinação das propriedades mecânicas das amostras, para realização do ensaio de tração direta na fibra utilizou-se como referência a norma ASTM C1557-14 (2014).

As fibras foram submetidas ao ensaio de tração a Máquina Universal de Ensaio Modelo Shimadzu AG-X, equipada com célula de carga de 10 kN, utilizando taxa de deslocamento de 3 mm/min com comprimento útil de 5,0 cm.

A resistência à tração das fibras (R) em mega pascal (MPa) foi calculada conforme

$$R = \frac{P}{A}$$

Onde:

- P é carga de ruptura expressa em newton (N);
- A é a área da seção transversal da fibra, determinada nas análises de microscopia, medida em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>);

#### **4.2.3 Dosagem e produção das argamassas**

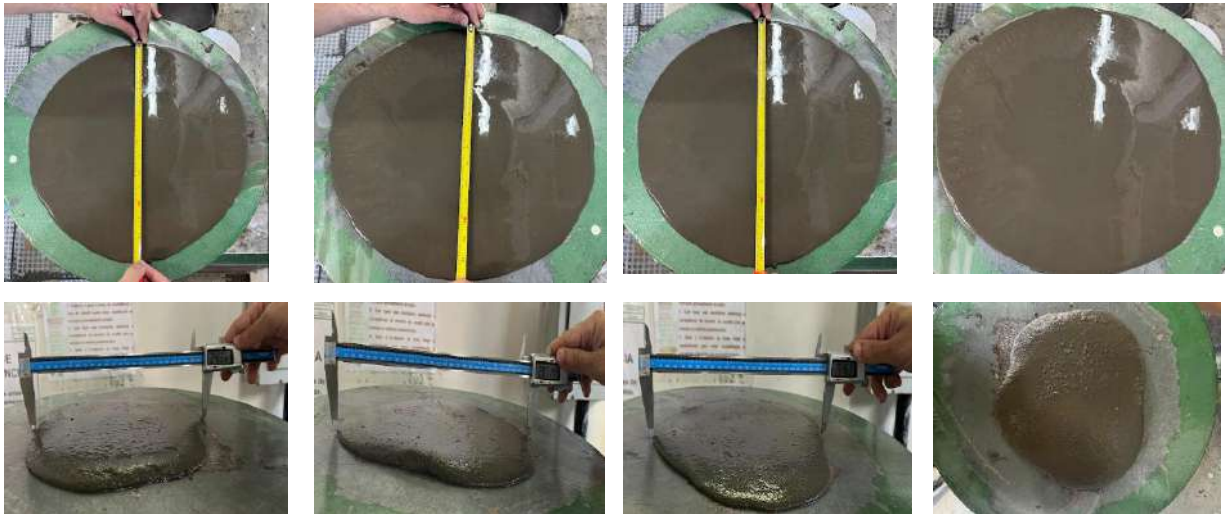
O estudo realizado da dosagem e produção das argamassas foi realizado no laboratório de Ensaio Mecânicos do IFPB Campus João Pessoa.

Para produção da argamassa foi adotado o traço de cimento e areia na proporção em massa dos materiais de 1:3.

Os primeiros estudos foram desenvolvidos com o objetivo de obter uma argamassa com índice de consistência de 260±5mm para argamassas de consistência padrão para aplicação em revestimentos conforme sugere a NBR 13276 (ABNT, 2016) utilizando os procedimentos indicados na norma e variando a relação do consumo de água cimento.

Para a argamassa de referência, sem adição de fibras, foram testadas as proporções de 0,72; 0,54; 0,62 e 0,56 para a relação de água/cimento das misturas, obtendo-se para esse último o índice de consistência médio igual a 262,77mm, utilizando-se o traço 1:3, as medidas dos testes realizados estão mostradas na Figura 11.

**Figura 11** - Ensaio do índice de Consistência realizado para dosagem da argamassa



Para dosagem de fibras foram adotados os teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibra em relação ao volume de argamassa, a escolha dos percentuais está de acordo com as taxas usuais utilizadas em estudos sobre compósitos de matriz cimentícia (Priyadharshini, e Ramakrishna *et. al*, 2018; De Azevedo *et. al*, 2021; De Azevedo *et. al*, 2020).

No estudo da dosagem das argamassas foi mantido o fator de relação água/cimento constante para todos os teores de fibra estudados, como um dos objetivos da pesquisa foi investigar o efeito da variação do teor de fibra adicionada, optou-se pela manutenção dos parâmetros na relação dos materiais constituintes da matriz cimentícia constantes, conforme adotado por De Aquino *et. al* (2022) e De Azevedo *et. al* (2021).

Foram testadas as seguintes misturas de argamassa de referência (REF), sem adição de fibras, argamassa reforçada com fibras de carnaúba não submetidas ao tratamento alcalino proposto, nos teores de 0,5% (FNT-0,5), 1,0% (FNT-1,0) e 1,5% (FNT-1,5%) e argamassa reforçada com fibras de carnaúba submetidas a tratamento alcalino, nos teores de 0,5% (FT-0,5), 1,0% (FT-1,0) e 1,5% (FT-1,5%), conforme resumido na Tabela 5.

**Tabela 5-** Proporções das misturas de argamassa no traço 1:3

Mistura	F <sub>A/C</sub>	Traço	Aplicação do Tratamento	Teor de fibra
A-REF	0,56	1:3	-	0%
ARG FNT - 0,5%	0,56	1:3	Não	0,5%
ARG FNT - 1,0%	0,56	1:3	Não	1,0%
ARG FNT - 1,5%	0,56	1:3	Não	1,5%
ARG FT - 0,5%	0,56	1:3	Sim	0,5%
ARG FT - 1,0%	0,56	1:3	Sim	1,0%
ARG FT - 1,5%	0,56	1:3	Sim	1,5%

Os procedimentos de preparo das argamassas foram realizados de acordo com o sugerido por Ferreira *et. al* (2015). Todos os componentes secos (cimento, areia e fibras) devem ser homogeneizados no misturador mecânico durante 30 s, e em seguida foi adicionada a água aos poucos enquanto a mistura era realizada por 1 min em rotação baixa a uma frequência do motor de 820 rpm, depois disso o processo foi parado durante 30 s para remover e homogeneizar o material retido nas paredes do misturador, em seguida o processo continuou por 2 min em rotação alta com frequência de 1680 rpm.

A determinação da proporção dos materiais utilizados na pesquisa foi feita a partir dos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais constituintes da argamassa resumidos na Tabela 6.

**Tabela 6 -** Massa específica e unitária dos materiais constituintes

	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Cimento</b>	3,18	-
<b>Areia</b>	2,53	1,55
<b>Fibra</b>	1,28	-

O consumo dos materiais determinado para cada mistura está detalhado na Tabela 7.

**Tabela 7** - Determinação do consumo dos materiais

Mistura	Volume de Argamassa (cm <sup>3</sup> )	Relação A/C	Materiais			
			Cimento (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Água (g)
REF	1000	0,56	485,38	1456,14	0,00	271,81
FT0,5%	1000	0,56	482,95	1448,86	6,40	270,45
FT1,0%	1000	0,56	480,53	1441,58	12,80	269,10
FT1,5%	1000	0,56	478,10	1434,30	19,20	267,74
FNT0,5%	1000	0,56	482,95	1448,86	6,40	270,45
FNT1,0%	1000	0,56	480,53	1441,58	12,80	269,10
FNT1,5%	1000	0,56	478,10	1434,30	19,20	267,74

#### 4.2.4 Caracterização das Argamassas

Definidos os procedimentos de preparo e consumo de materiais para produção das argamassas, a etapa seguinte consistiu na execução dos ensaios de caracterização no estado fresco e no estado endurecido. A Tabela 8 apresenta a relação de ensaios realizados para os estudos das argamassas e parâmetros relacionados, os procedimentos de execução estão descritos nas subseções seguintes.

**Tabela 8** - Relação dos ensaios de caracterização das argamassas

Propriedade	Unidade	Dimensão do corpo de prova (mm)	Nº de amostras*	Idade (dias)	Norma
<b>Ensaio de caracterização no Estado Fresco</b>					
Índice de consistência	mm	-	1	-	NBR 13276/2016
Ensaio de retenção de água	%	-	1	-	NBR 13277/2005
Densidade de massa	kg/m <sup>3</sup>	-	2	-	NBR 13278/2005
Teor de ar-incorporado	%	-	2	-	NBR 13278/2005
Squeeze flow	Nxmm	Ø100	1	-	NBR 15839/2010
<b>Ensaio de caracterização no Estado Endurecido</b>					
Resistência	MPa	40x40x160	6	7; 28	NBR

<b>à compressão</b>					13279/2005
<b>Resistência à tração na flexão</b>	MPa	40x40x160	3	7; 28	NBR 13279/2005
<b>Módulo de elasticidade dinâmico</b>	GPa	40x40x160	3	28	NBR 15630/2008
<b>Absorção por capilaridade</b>	%	40x40x160	3	28	NBR 15259/2005
<b>Coefficiente de capilaridade</b>	%	40x40x160	3	28	NBR 15259/2005
<b>Absorção por imersão e índice de vazios</b>	%	40x40x160	3	28	NBR 9778/2009
<b>Variação Dimensional</b>	mm/m	25x25x285	3	28	NBR 15261/2005
<b>Resistência potencial à aderência</b>	MPa	-	12	28	NBR 13528/2019

\*Indica o número de amostras produzidas para cada teor de fibra adicionado;

#### 4.2.4.1 Ensaios no Estado Fresco

Para o presente estudo os ensaios no estado fresco foram determinados com o objetivo de avaliar o atendimento aos parâmetros classificatórios indicados na norma NBR 13281 (ABNT, 2023) que estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao revestimento de paredes e teto, as propriedades também foram avaliadas pelo ensaio de Squeeze Flow, normatizado pela NBR 13281 (ABNT, 2023) que pode contribuir para compreender como a adição da fibra de carnaúba afeta a mistura do ponto de vista da viscosidade e tensões de escoamento das argamassas em seu estado fresco.

Os procedimentos adotados para realização dos ensaios estão descritos nas subseções seguintes.

#### 4.2.4.1.1 Índice de Consistência

O ensaio tem como objetivo determinar o índice de consistência da argamassa, e foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016) descritos a seguir.

Imediatamente após a sua preparação, a argamassa foi utilizada para preencher um tronco de cone padrão, posicionado de forma centralizada sobre a mesa para índice de consistência, os aparelhos devem estar limpos e secos.

Segurando o molde firmemente, procedeu-se o seu preenchimento em três camadas, aplicando respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com soquete, de maneira a distribuí-la uniformemente, ao final, realizou-se o arrasamento do molde com uma régua metálica formando um ângulo de 45° em relação a superfície da argamassa, retirou-se o molde, e então utilizando a mesa de consistência, de forma manual, foram aplicados 30 golpes durante 30 s, verificando-se nesse momento o espalhamento da argamassa, as medidas foram registradas com o auxílio de um paquímetro, a medida foi tomada em três diâmetros tomados em pares de pontos distribuídos ao longo do perímetro, o índice de consistência da argamassa, corresponde à média das três medidas realizadas (Figura 12).

**Figura 12** - Procedimento de verificação do índice de consistência



#### 4.2.4.1.2 Ensaio de retenção de água

Ensaio realizado com o objetivo de determinar o percentual de retenção de água na argamassa e foi desenvolvido conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13277 (ABNT, 2005), conforme detalhado a seguir.

Após preparação da argamassa, utilizou-se um papel filtro previamente umedecido colocado sobre o fundo do prato, em seguida o conjunto foi colocado

sobre o funil de Buchner, e acionada a bomba de vácuo, aplicando ao conjunto uma sucção com pressão de 51 mmHg durante 90 s, abrindo-se a torneira para remoção do excesso de água do papel filtro, realizou-se então pesagem do conjunto registrando-se a massa do prato vazio com o papel filtro umedecido ( $m_v$ ).

Na etapa seguinte, o prato foi preenchido com argamassa e realizou-se o adensamento aplicando-se 37 golpes de soquete, sendo 21 na região das bordas e 16 na região central, posteriormente foi feito o arrasamento da argamassa sobre o prato para então realizar a pesagem do conjunto com a argamassa antes de proceder a sucção ( $m_a$ ).

Novamente, o prato foi colocado sobre o funil de Buchner e aberta a torneira para aplicação da sucção correspondente a 51 mmHg durante 15 min, fechando-a em seguida (Figura 13).

**Figura 13** - Aplicação da Sucção ao prato cheio de argamassa



Após a sucção o prato com a argamassa foi novamente removido do equipamento e pesado, registrando a massa após a sucção ( $m_s$ ).

A retenção de água foi calculada conforme a Eq. 5 e Eq. 6 e o resultado expresso em porcentagem.

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \right] 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$AF = \frac{m_v}{m + m_w} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

- $m_a$  é a massa do conjunto com argamassa;
- $m_s$  é a massa do conjunto após a sucção;
- $m_v$  é a massa do conjunto vazio;
- AF é o fator de água/argamassa fresca;
- $m_v$  é a massa total de água acrescentada á mistura;
- m é a soma das massas dos componentes anidros.

#### **4.2.4.1.3 Ensaio de densidade de massa e teor de ar-incorporado**

O ensaio utiliza o método pressiométrico e indica a quantidade de vazios com ar na argamassa, desenvolvido conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

Para realização do ensaio, cada mistura foi introduzida em um recipiente cilíndrico preenchido com 3 camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando-se a cada camada com uma espátula na posição vertical 20 golpes, posteriormente procede-se três quedas do recipiente, realizando-se em seguida o arrasamento da mistura para eliminar o excesso de material fora do volume do recipiente, registra-se a massa do molde preenchido com a argamassa fresca e procede-se os cálculos conforme especificado na norma para obtenção das propriedades.

#### **4.2.4.1.4 Ensaio de Squeeze Flow**

O ensaio de squeeze-flow consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas provocando a deformação radial da mistura, de acordo com Cardoso, Pileggi e John (2010) contribui para compreender o comportamento das argamassas durante o processo de aplicação, espalhamento e acabamento.

Normalizado pela NBR 15839 (ABNT, 2010), permite avaliar com precisão o grau de deformação das argamassas variando a velocidade de aplicação da carga.

Conforme a norma, para realização do ensaio foram utilizadas amostras com 10 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com velocidade de ensaio de 0,1 mm/s e 3

mm/s, avaliando a deformação das argamassas nos tempos de 10 min e 60 min e 15 min e 65 min, respectivamente.

Para realização do ensaio as argamassas foram preparadas no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – LABEME da UFPB, e ensaiadas utilizando a Máquina Universal de Ensaio - Shimadzu AG-X 10 kN do Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB.

A execução ocorreu de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010) com a aplicação de uma compressão na através de uma placa superior (punção) sobre uma placa inferior (base).

Inicialmente foi feita a moldagem da amostra com argamassa sobre superfície seca e limpa utilizando o molde e o gabarito. Utilizando a espátula, a massa foi acomodada uniformemente sobre o gabarito evitando a compactação do material e nivelando a superfície com a espátula para garantir um bom acabamento superficial. Procedeu-se a remoção cuidadosa do molde e do gabarito para preservar a forma da amostra, transportando a placa inferior com a amostra centralizada para a máquina universal de ensaios e acoplado a placa sobre a base, realizou-se então o início da aplicação da carga, conforme Figura 14.

**Figura 14** - Execução do Ensaio de Squeeze Flow



Os resultados squeeze-flow foram expressos como gráficos de carga versus deslocamento, plotados como auxílio do Software Origin pro 2024b.

#### 4.2.4.2 Ensaios no estado endurecido

Para as avaliações no estado endurecido serão considerados os ensaios determinados na norma NBR 13281/2023, conforme detalhado nas subseções a seguir.

##### 4.2.4.2.1 Resistência à tração na flexão e compressão axial

Realizados conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 13279 (ABNT, 2005), a resistência à tração na flexão e compressão axial foram avaliadas para as idades de 7 e 28 dias, sendo moldados 3 corpos de prova prismáticos nas dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada idade ensaiada e para cada tipo de mistura, variando o teor de fibra e a aplicação do tratamento alcalino, sendo moldados para estes ensaios de total de 42 corpos de prova.

A avaliação da resistência à tração na flexão foi feita utilizando a Máquina Universal de Ensaio - Shimadzu AG-X 10kN do Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, através da aplicação de carga uniforme e sem choques com velocidade controlada a uma taxa de 50 N/s (Figura 15).

**Figura 15** - Máquina Universal de Ensaio montada para execução dos ensaios de Flexão



Para o ensaio realizado, a resistência à tração flexão  $R_f$  é calculada pela Eq. 7, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

$$R_f = \frac{1,5FL}{40^3} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

- F é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma expressa em newton (N);
- L é a distância entre os suportes medida em milímetros (mm);

Após rompimento à tração na flexão, as metades dos corpos de prova foram utilizados para testagem da resistência à compressão utilizando o equipamento para ensaios de resistência disponível no laboratório ensaios mecânicos do IFPB, aplicando cargas uniformes e sem choques com velocidade controlada a uma taxa de 500 N/s, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio conforme

Figura 16, de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga.

**Figura 16** - Ensaio de compressão axial



A resistência à compressão ( $R_c$ ) é calculada segundo a Eq. 8:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

- $F_c$  é a carga máxima aplicada expressa em newton (N);

#### **4.2.4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico**

Realizado conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 15630 (ANBT, 2008) trata-se de um ensaio não destrutivo que utiliza a propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos através de corpos de prova, para o presente estudo foram utilizados corpos de provas prismáticos de argamassa nas dimensões 4,0 cm x 4,0 cm x 16,0 mm.

O ensaio foi realizado utilizando o aparelho ultrassônico modelo PUNDIT LAB (+) da marca PROCEQ, o qual é composto por 02 transdutores de 54 kHz com diâmetro de superfície de contato de 36,77 mm ensaiados em três corpos de prova de argamassas para cada teor de fibra analisada nas condições tratada e não tratada totalizando análise de 21 corpos de prova;

Para realização do ensaio, os corpos de prova com idade de 28 dias, foram inicialmente pesados e medidos para determinação da sua densidade aparente, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), sendo verificado que as faces dos corpos de prova estava lisas e planas (superfícies de 4,0 cm x 4,0 cm), foi aplicada então uma camada de gel de contato na superfície dos transdutores do equipamento centralizados ao eixo do corpo de prova, após verificação da qualidade da medida, registrou-se o menor valor apresentado no aparelho de um total de 3 leituras efetuadas para cada corpo de prova.

O aparelho fornece valores correspondentes à velocidade do pulso ultrassônico e do tempo para que a onda atravessasse o corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 17.

**Figura 17** - Execução do Ensaio de Ultrassom



Para determinação dos resultados a velocidade de propagação da onda é calculada conforme a Eq. 9:

$$V = L/t \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

- V é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressão em milímetros por microssegundos;
- L é a distância entre os pontos de acoplamento entre os transdutores expressa em milímetros;
- T é tempo registrado pelo mostrados digital, expresso em microssegundos;

Com os dados obtidos, o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado conforme a Eq. 10

$$E_d = \frac{v^2 \rho (1+\mu)(1+2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde

- $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico expresso em megapascal (MPa);
- $v$  é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressão em milímetros por microssegundos;

- $\rho$  é a densidade de massa aparente do corpo de prova expressa em  $\text{kg/m}^2$ ;
- $\mu$  é o coeficiente de poisson (adota-se 0,2);

#### **4.2.4.2.3 Ensaio de Absorção de água por capilaridade, Absorção por imersão e índice de vazios**

Os procedimentos para realização do ensaio de absorção por capilaridade foram executados conforme prescritos na NBR 15259 (ABNT, 2005), foram moldados 3 corpos de prova para cada teor de fibra adotado, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), totalizando 21 corpos de prova prismáticos de 4,0 cm x 4,0 cm x 16,0 cm.

Após a desmoldagem que ocorreu entre 24 h e 48 h da sua confecção os corpos de prova foram colocados em cura, até que se completasse o período de 28 dias, os corpos de prova foram lixados e limpos para então ser colocados em estufa a 105°C durante 24 horas, após retirados, aguardou-se que os corpos de prova atingissem a temperatura ambiente para então ser determinada a massa inicial ( $m_0$ ).

Em seguida, os corpos-de-prova foram então posicionados com face quadrada sobre suportes no recipiente de ensaio preenchido com água em nível constante evitando molhar suas superfícies laterais e verificando que o nível de água deve permanecesse sempre igual a  $5 \pm 1$  mm acima da face em contato com a água, conforme Figura 18.

**Figura 18** - Ensaio de Absorção por capilaridade



A verificação da absorção se água foi feita aos 10 min ( $m_{10}$ ) e 90 min ( $m_{90}$ ) de ensaio, contados a partir do momento da colocação dos corpos de prova em contato com a água. Antes de cada pesagem realizou-se a remoção do excesso de água com um pano úmido.

A absorção de água por capilaridade em cada tempo é calculada pela Eq. 11:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

- $A_t$  é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, expressa em gramas por centímetro quadrado;
- $m_t$  é a massa do corpo-de-prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas;
- $m_0$  é a massa inicial do corpo-de-prova, em gramas;
- $t$  corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos;
- 16 é a área do corpo-de-prova, em centímetros quadrados.

De acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005), o coeficiente de capilaridade (C) é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 min e aos 90 min, considerando-se como:

- Abscissa: a raiz do tempo, em minutos;
- Ordenada: a absorção de água por capilaridade, em gramas por centímetro quadrado.

O coeficiente de capilaridade é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e aos 90 min. O resultado para cada corpo-de-prova é calculado pela diferença entre as taxas de absorção aos 10 e 90min.

$$C = m_{90} - m_{10}$$

onde:

- C é o coeficiente de capilaridade, em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>).

Também foram analisados a absorção de água por imersão e o índice de vazios, os testes foram baseados na NBR 9778 (ABNT, 2009), para sua realização utilizou-se os mesmos corpos de prova usados no ensaio de absorção por capilaridade, inicialmente os corpos de prova foram mantidos em estufa por 72 horas, visando eliminar a umidade do material, decorrido esse tempo foi verificada a massa para registro da massa seca ( $m_s$ ), em seguida, promoveu-se a sua imersão em água também pelo período de 72 horas, após essa etapa, ocorreu a pesagem dos corpos de prova na condição submersa ( $m_s$ ), realizada com o auxílio de uma balança hidrostática.

Na última etapa, as amostras foram retiradas da água, enxugadas e pesadas para registro do seu peso saturado ( $m_{sat}$ ) com o auxílio de uma balança hidrostática.

A determinação da absorção de água por imersão é calculada através da Eq. 12:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

- A é a absorção de água por imersão em %;
- $m_{sat}$  é a massa saturada em g;
- $m_s$  é a massa seca em (g)

O índice de vazios é calculada através determinação da absorção de água por imersão é calculada através da Eq. 13:

$$I = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{sub}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

- I é o índice de vazios em %;
- $m_{sat}$  é a massa saturada em g;
- $m_s$  é a massa seca em g;
- $m_{sub}$  é a massa submersa em g;;

#### 4.2.4.2.4 Ensaio de Variação Dimensional (retração ou expansão linear)

Para avaliação da retração por secagem foram adotados os procedimentos estabelecidos na norma NBR 15261 (ABNT, 2005).

Para cada mistura estudada foram moldados 3 corpos de prova com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm, foram usados moldes de acrílico confeccionados nas dimensões requeridas. Para viabilizar a aferição das leituras as extremidades dos moldes foram dotadas de pinos metálicos. Após 48 h os corpos de prova foram desmoldados e mantidos a temperatura ambiente, sendo registradas leituras de massa por meio da pesagem dos corpos de prova e da variação dimensional dos corpos de prova nas idades de 0, 1, 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem,

A verificação da variação do comprimento com o auxílio de um equipamento dotado de um relógio digital conforme indicado na Figura 19. Para efetuação das leituras das medidas de comprimento, foi feita inicialmente a medição de uma barra metálica posicionada de forma centralizada a agulha do relógio, tomada como de referência para o comprimento inicial, realizando-se a tara do relógio com a barra na

posição de medida. Após esse procedimento a barra foi retirada e procedeu-se as medidas dos corpos de prova prismáticos.

**Figura 19** - Medidas dos corpos de prova no ensaio de retração



Para cada idade, a variação dimensional dos corpos de prova foi calculada de acordo com a Eq. 14:

$$\Delta m_1 = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

- $\Delta m_1$  é a variação de massa, arredondada ao décimo mais próximo, em porcentagem;
- $m_i$  é a massa na idade final, em gramas;
- $m_0$  é a massa após a desforma do corpo-de-prova, em gramas.

#### 4.2.4.2.5 Resistência de aderência à tração

O ensaio deve ser realizado para avaliar a aderência superficial do revestimento sobre painéis de alvenaria com aproximadamente 1,0 m<sup>2</sup>, chapiscados e revestidas com as argamassas analisadas na pesquisa, conforme Figura 20.

**Figura 20** - Painéis confeccionados para execução do ensaio de resistência de aderência superficial (a) antes e (b) após a execução do revestimento



(a)



(b)

A resistência de aderência à tração das argamassas foi determinada conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 13528 (ABNT, 2019).

Para cada painel foram ensaiados 12 corpos de prova de mesmas características, os testes de aderência foram realizados após 28 dias da realização do revestimento, a distribuição dos corpos de prova foi feita de forma aleatória, respeitando os limites de espaçamento e afastamento das bordas do painel conforme recomendações da norma.

No dia anterior ao ensaio, com as superfícies limpas e secas, conforme Figura 21, foi feita a colagem das pastilhas metálicas com diâmetro igual a 50 mm.

**Figura 21** - Colagem das pastilhas para execução do ensaio de resistência à aderência superficial

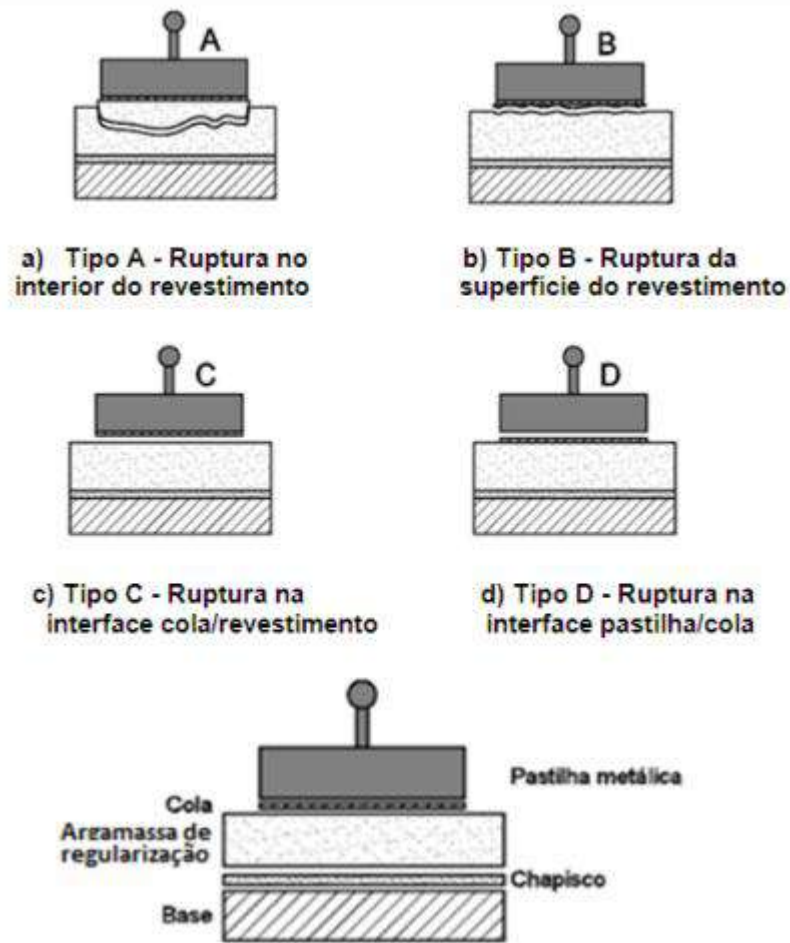


Para realização do ensaio de tração foi utilizado um aderímetro manual com capacidade 1200 Kgf, os resultados para cada corpo de prova foi anotada, registrando-se também a forma de ruptura no interior do revestimento, conforme detalhado a seguir:

- Tipo A – ruptura no interior do revestimento;
- Tipo B – ruptura da superfície do revestimento, onde partes da argamassa são arrancadas;
- Tipo C – ruptura na interface cola/revestimento, quando apenas poucos grãos são arrancados;
- Tipo D – ruptura na interface pastilha metálica/cola.

A Figura 22 a seguir ilustra as os padrões de ruptura possíveis:

**Figura 22** - Formas de ruptura dos corpos de prova



Fonte: NBR 13528-3 (ABNT, 2019)

A resistência á aderência superficial  $R$ , expressão em megapascal (MPa) foi determinada pela Eq. 15

$$R_s = \frac{P}{A} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

- $P$  é carga de ruptura expressa em newton (N);
- $A$  é a área superficial das pastilhas utilizadas no ensaio em milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ).

#### 4.2.4.3 Análise Estatística

Os dados obtidos nos ensaios foram tratados por análise estatística de variância (ANOVA) baseada na distribuição por amostragem do teste “F” de

Snedecor utilizado para identificar diferenças entre médias, conforme Vieira (2006), a análise será realizada com o auxílio do software *Origin Pro 2024*.

Nesse estudo a análise de variância aplicada para tratar os resultados dos ensaios mecânicos (resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade dinâmico),

Utilizando a metodologia adotada por Da Silva *et. al* (2018) e Junio *et. al* (2020) realizaram em seus estudos, será admitido um nível de confiança de 95%, onde a hipótese alternativa (H1) é assumida se o valor de F (calculado) é superior ao  $F_{\text{crítico}}$  (tabulado), concluindo assim que ao nível de significância de 5% se há diferença entre as médias dos resultados dos ensaios. Observando a ocorrência da diferença significativa entre os resultados encontrados, deverá ser aplicado o teste de Tukey para avaliar quantitativamente e realizar a comparação entre as médias obtidas para teor de fibras e aplicação do tratamento, dois a dois, verificando se é possível ou não rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias comparadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização das Fibras

Os ensaios de caracterização da fibra de carnaúba permitiram obter informações sobre suas propriedades que possibilitaram relacioná-las aos resultados encontrados no estudo das argamassas.

#### 5.1.1 Caracterização física da fibra

No estudo dos materiais cimentícios, a massa específica, o teor de umidade e a absorção de água das fibras são propriedades que afetam diretamente o desempenho das argamassas. Os resultados encontrados para a análise dessas propriedades físicas da fibra de carnaúba estão detalhados na Tabela 9.

**Tabela 9** - Propriedades Físicas da Fibra de Carnaúba

	Absorção (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Umidade (%)
<b>Fibra de Carnaúba</b>	167,93	1,28	10,36

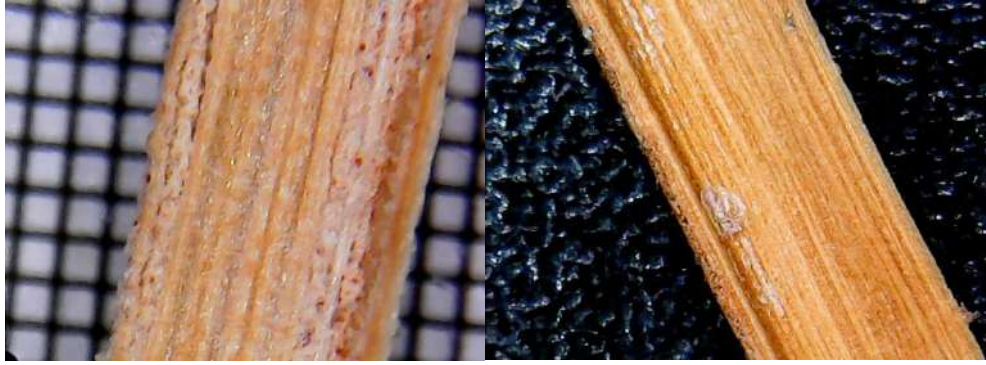
Os resultados encontrados corroboram com outros trabalhos sobre a fibra de carnaúba, Junio *et. al* (2022) estudaram a correlação entre a variação do diâmetro das fibras e suas propriedades físicas e mecânicas, obtendo uma massa específica de  $1,13 \pm 0,22 \text{g/cm}^3$ . Os autores observaram que fibras de maior diâmetro apresentavam menores valores de massa específica devido ao aumento da presença de vazios em seu interior, conforme pode ser observado nas imagens da Figura 23, obtidas com auxílio de um microscópio digital de bancada do Laboratório Materiais e Biosistemas da UFPB.

Com relação à capacidade de absorção de águas das fibras, Melo *et. al* (2012) destacam a importância do estudo dessa propriedade pois a alta hidrofiliabilidade das fibras vegetais são um fator limitante para sua aplicação em compósitos por produzir inchaço, aumento da massa e redução da resistência mecânica.

No caso dos materiais cimentícios especificamente, a alta absorção de água pelas fibras pode contribuir negativamente para o desempenho das argamassas tanto no estado fresco, por atuarem na redução da trabalhabilidade da mistura, conforme destacam Awoyera *et. al* (2022), como no estado endurecido afetando a resistência e a durabilidade, conforme Fernandes *et. al* (2011).

**Figura 23** - Fibra da Carnaúba





Para o presente estudo feita a análise da absorção de água nas fibras na sua condição natural e para a fibra tratada. Foram realizadas aferições aos 30min, 24h e 7 dias, os testes foram realizados em triplicata, os resultados podem ser encontrados na Tabela 10

**Tabela 10 - Absorção de água pelas fibras de carnaúba**

Material	Absorção (%)		
	Ab <sub>30min</sub>	Ab <sub>24h</sub>	Ab <sub>7dias</sub>
<b>Fibra não tratada</b>	136,52±4,14	177,38±2,28	188,05±7,92
<b>Fibra tratada</b>	121,25±5,98	158,4±32,87	188,47±11,60

Os resultados da absorção de água total das fibras de carnaúba corroboram com encontrados Fernandes *et. al* (2011), analisando a influência dos tratamentos com hexano, tetracloreto de carbono e alcalino com NaOH no total de água absorvido pelas fibras, os autores verificaram uma absorção de aproximadamente 180% ao término do processo para as fibras não tratadas e para todos os tratamentos analisados, no entanto, verificaram também a aplicação dos tratamentos contribuiu para retardar o processo, conforme observado no presente estudo onde a absorção foi mais rápida para as fibras não tratadas, esse resultado é benéfico para as argamassas, pois contribui para reduzir a absorção da água disponível na mistura para as reações de hidratação do cimento nos momentos iniciais.

### 5.1.2 Análise Térmica

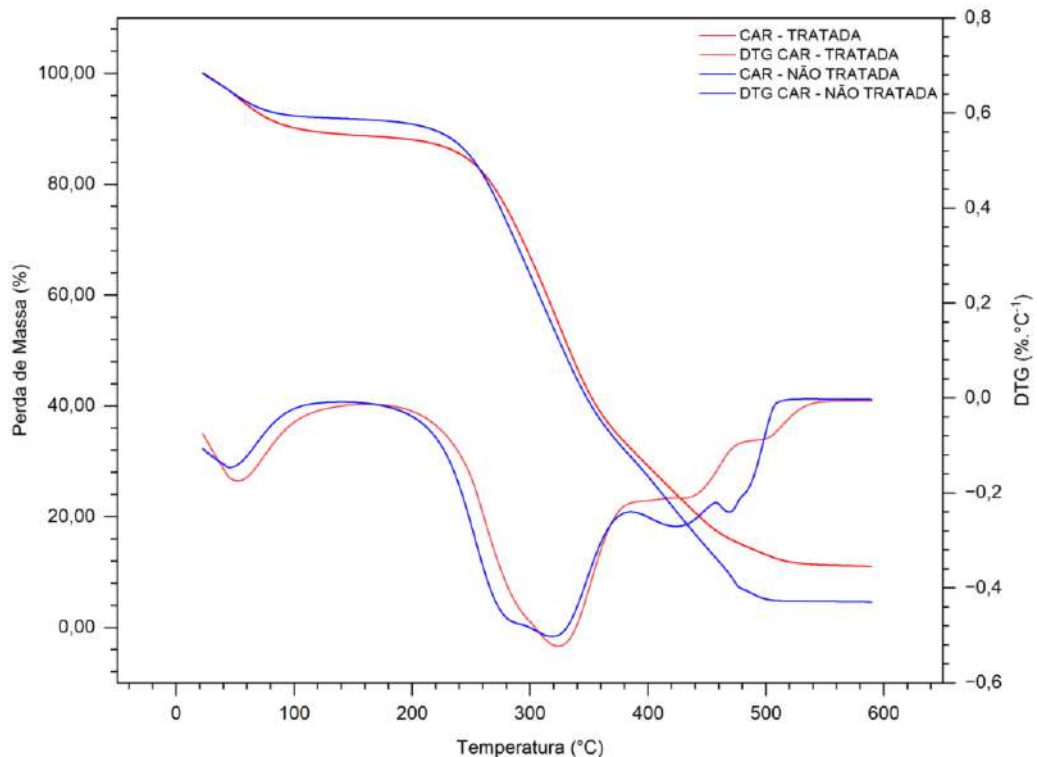
De acordo com Fornari (2017) a degradação térmica das fibras vegetais ocorre através de três eventos distintos relacionados à decomposição de seus principais constituintes, a celulose, hemicelulose e lignina. Para a hemicelulose, o

pico de degradação pode ocorrer na faixa entre 200°C a 260°C, é a molécula mais suscetível à elevação da temperatura por não apresentar estrutura molecular organizada que facilita a separação e destruição da sua estrutura, através da energia térmica adicionada ao sistema e o baixo peso molecular se comparada à celulose. A Celulose é o segundo principal componente na escala crescente de resistência ao calor, apresenta temperatura de degradação entre 240°C a 350°C, suas condições de arranjo molecular cristalino influenciam a resistência térmica, porém a região amorfa exige menor quantidade de energia. A lignina é composta por grupamentos fenólicos interligados, o resultando na estrutura mais resistente à degradação por calor entre os demais constituintes.

As curvas de Termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) estão representadas nos gráficos da Figura 24 e foram obtidas nas análises realizadas nesse estudo para as fibras de carnaúba nas condições (a) natural e (b) tratada.

No gráfico estão destacados os eventos de decomposição dos constituintes lignocelulósicos da fibra na condição natural. O primeiro evento observado foi relativo à evaporação da água responsável pela umidade natural da fibra, observou-se um crescimento da taxa de evaporação entre 30°C e 47,5°C, nesse intervalo houve perda de 3,4% de massa, a partir desse ponto é possível observar pela curva da DTG uma queda na taxa de evaporação, que foi mantida até a temperatura de 152°C, quando a perda de massa total de 9,34%, esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Fernandes *et. al* (2011) e estão de acordo com o percentual de umidade da fibra determinado na etapa de caracterização física, os autores relacionaram a perda de umidade observada à liberação da água absorvida ou combinada durante o processo de desidratação em razão da alta hidrofiliabilidade característica da fibra da palha da carnaúba.

**Figura 24** - Curva de análise térmica das fibras na condição natural e tratada



No segundo evento térmico a perda de massa total foi de 69,48%, sendo observados dois picos na curva de DTG, no intervalo entre 206° e 420°C, intervalo onde ocorre a degradação da hemicelulose e da celulose.

O terceiro evento ocorreu entre 420°C e 477°C, caracterizado pela degradação da lignina, nesse intervalo foi verificada uma perda de massa de 12,65%. Ao término do ensaio, a perda de massa total foi de 91,47%.

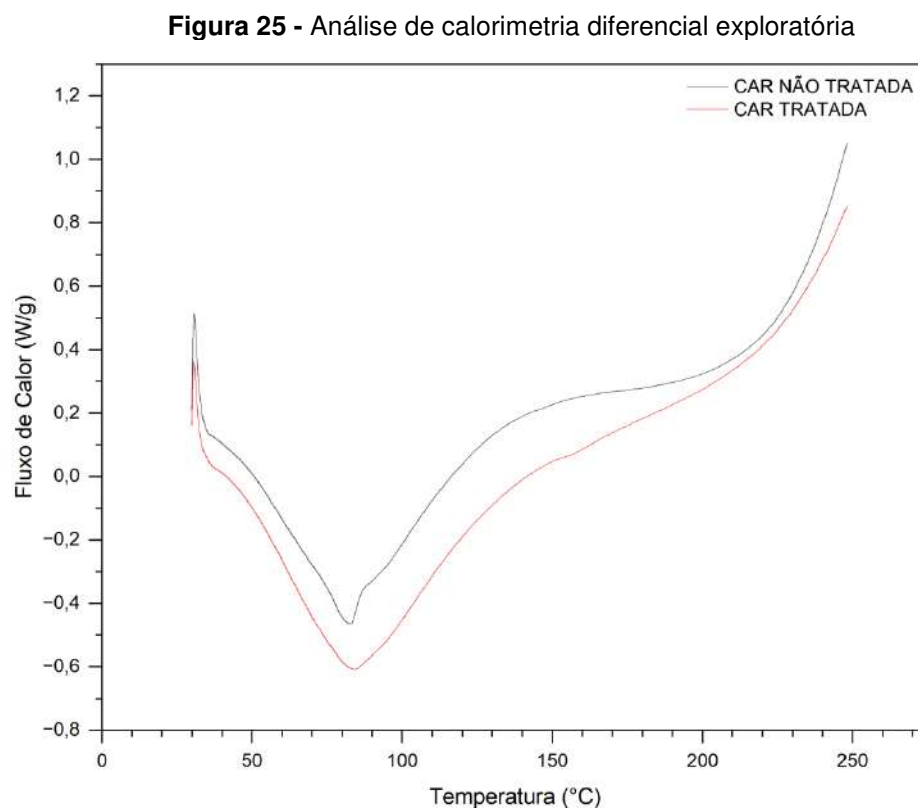
Os resultados obtidos para as fibras sem tratamento corroboram com os resultados encontrados por Junio *et. al* (2022), os autores identificaram uma perda de massa de 9,6% referente a perda de umidade das fibras entre 30°C e 200°C. No intervalo entre 200°C e 414°C, uma perda de massa total de 53,5% decorrente da degradação da celulose e da hemicelulose e por fim a perda de 11,6% decorrente da degradação da lignina.

A curva de TG e DTG obtidas para a fibra na condição tratada indicou que o primeiro evento, relacionado a evaporação da água presente nas fibras correspondeu a perda 11,69% da massa total das fibras até a temperatura de cerca de 200°C, o acréscimo do teor de umidade corrobora com os resultados observados por Fernandes *et. al* (2011), no estudo, os autores identificaram que os maiores teores de umidade observados ocorreram para as fibras que receberam o

tratamento alcalino com NaOH, isso indica que o tratamento aplicado contribui para o aumento da resistência da fibra à perda de umidade. O segundo evento, envolveu a degradação de dois constituintes, a hemicelulose e a celulose, que ocorreram no intervalo de 200°C a 420°C, com perda de 63,92% da massa total. O terceiro evento de decomposição ocorreu na entre 420°C e 477°C, verificando-se uma perda de massa associada de 11,07% decorrente da degradação da lignina, a perda total de massa foi 86,68%. Os resultados obtidos estão de acordo outros estudos que analisaram a estabilidade térmica das fibras de carnaúba submetidas à tratamentos, como Fernandes *et. al* (2011).

Comparando os resultados das fibras nas duas condições analisadas, foi verificada uma redução nos teores de hemicelulose e de lignina.

O ensaio de DSC evidenciou a ocorrência de um pico endotérmico na temperatura igual a 83°C, conforme Figura 25.



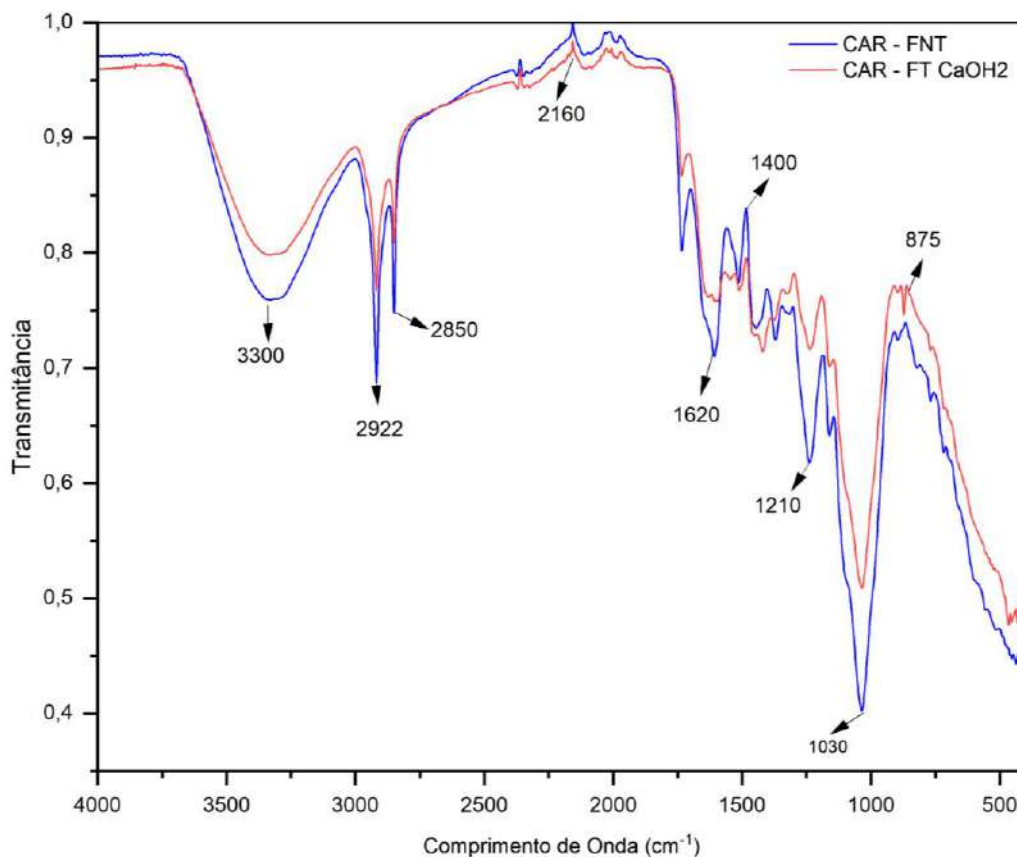
Conforme destacam Junio *et. al* (2023) o pico endotérmico observado está relacionado à liberação da umidade aderida à superfície hidrofílica. O acréscimo da taxa no fluxo identificado para as fibras tratadas indicam o aumento da resistência

térmica à perda da umidade da fibra, que confirmam os resultados encontrados na análise de termogravimetria.

### 5.1.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os gráficos da Figura 26 apresentam os espectros encontrados na análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier para as fibras de carnaúba na condição natural e na condição tratada.

**Figura 26** - Espectros de FTIR para fibras de carnaúba na condição natural e tratada



A análise das curvas permitiu identificar que os espectros observados para a fibra de carnaúba natural é semelhante ao de outras fibras vegetais, como a fibra de sisal (Ferreira *et. al*, 2015), a fibra de açai (Azevedo *et. al*, 2021), e a fibra da folha do coco (Surnam e Imrith, 2023), onde se verificou que o tratamento alcalino contribuiu para redução nos picos, principalmente nas bandas observadas em 3300cm<sup>-1</sup>, e 1030cm<sup>-1</sup>. Resultado semelhante ao observado no presente estudo, essas bandas estão associadas respectivamente ao grupo OH e à deformação do

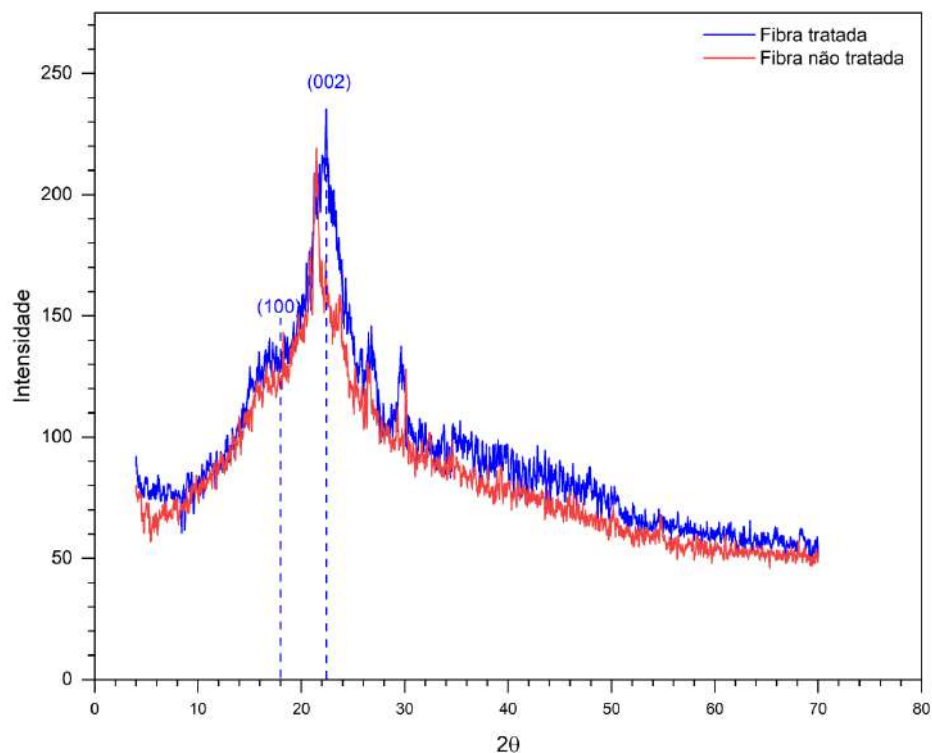
álcool secundário e éter alifático, conforme descreve Fornari (2017), o que indica um enfraquecimento dessas ligações decorrentes do processo de tratamento aplicado.

Os picos relacionados as bandas  $2922\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas aos grupos  $\text{CH}_2$  comumente observados nas moléculas de celulose e hemicelulose (Junio *et. al*, 2022), a alteração observada na intensidade dos picos revele o efeito do tratamento aplicado nas fibras.

#### 5.1.4 Difração de raios-X

Os difratogramas obtidos na análise de DRX da fibra natural e tratada estão apresentados na Figura 27.

**Figura 27** - Difratograma da fibra de Carnaúba natural e tratada



Para a fibra de carnaúba, de acordo com da Silva *et. al* (2017), o pico de difração correspondente a rede 002 ocorre para  $2\theta = 22,5^\circ$  e a pico de intensidade da linha de base correspondente a rede 001 ocorre para  $2\theta = 18^\circ$ .

A Tabela 11 apresenta os dados de intensidade dos picos para as redes 002 e 001.

**Tabela 11** - Intensidade dos picos das redes 001 e 002 identificados na DRX

<b>Material</b>	<b>2<math>\theta</math> = 18°</b>	<b>2<math>\theta</math> = 22,5</b>
Fibra não tratada	119,6	157,6
Fibra tratada	130,4	214,0

Assim, para a fibra na condição natural obteve-se um índice de cristalinidade igual a 24,11% e para a fibra tratada o índice de cristalinidade de 39,06%, sendo verificado que o pré-tratamento aplicado aumentou o índice de cristalinidade da fibra.

O índice de cristalinidade encontrado nas análises foi semelhante ao observado por Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria (2023) para as fibras de abacá na condição natural e submetidas a tratamento alcalino com NaOH, os autores atribuíram o acréscimo à eficiência do tratamento aplicado às fibras na remoção do material não cristalino, como a hemicelulose e a lignina, também verificados no presente estudo conforme indicado na análise de termogravimetria, mesmo resultado obtido por Ferreira et. al (2015).

O aumento da cristalinidade do material tem efeito positivo para os compósitos cimentícios, conforme destaca De Aquino *et. al* (2022), contribui para o aumento da adesão da fibra à matriz cimentícia.

No estudo da incorporação de fibras à materiais cimentícios Marvila *et. al* (2021) explicam que as fibras mais cristalinas tem melhor resistência e apresentam melhor molhabilidade na matriz favorecendo a adesão entre os dois componentes.

### **5.1.5 Caracterização Mecânica**

Os resultados do ensaio de tração direta realizado para caracterização mecânica são apresentados na Tabela 12, que também traz dados encontrados em outros estudos sobre as fibras de carnaúba.

**Tabela 12** - Resistência à tração direta das fibras de carnaúba

<b>Material</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Alongamento máximo</b>	<b>Referência</b>
Fibra de carnaúba natural	322,79±117,39	4,69±0,87	Presente estudo
Fibra de carnaúba tratada com CaOH <sub>2</sub>	144,48±90,09	2,50±1,44	Presente estudo
Fibra de Carnaúba natural	234,5±29,50	2,15±0,45	Melo <i>et. al</i> (2012)
Fibra de Carnaúba tratada com peróxido	195,00±47,00	2,15±0,45	Melo <i>et. al</i> (2012)
Fibra de Carnaúba natural	64.7 ± 40.9	5.59 ± 1.6	Junio <i>et. al</i> (2022)

A comparação dos resultados obtidos nessa pesquisa com outros trabalhos que estudaram as propriedades mecânicas das fibras de carnaúba evidenciam a variabilidade dos dados, que pode ser explicada pela heterogeneidade do material, assim como outros fatores relacionados como a forma de preparo e obtenção das fibras, Junio *et. al.* (2022) verificaram que existe uma variação das propriedades mecânicas das fibras com a variação diametral foi confirmada, explicado pela presença dos vazios internos observados na estrutura do material.

Quanto a influência do tratamento realizando das fibras, o estudo de Melo *et. al* (2012) indicou que houve uma redução na resistência da fibra para todos os tipos de tratamento analisados no estudo, também foi observado nesta pesquisa, relacionada ao processo de mineralização da fibra devido a deposição dos íons de cálcio da solução alcalina utilizada no processo de tratamento nos vazios da fibra.

## **5.2 Caracterização das argamassas**

### **5.2.2 Ensaio no Estado Fresco**

Os resultados dos ensaios realizados possibilitaram compreender o comportamento no estado das argamassas com diferentes teores de adição de fibra. Conforme Priyadharshini e Ramakrishna (2018) destacam, não há ensaios unificados que permitam conhecer o comportamento das argamassas em seu estado fresco, no entanto, através dos ensaios realizados foi possível obter

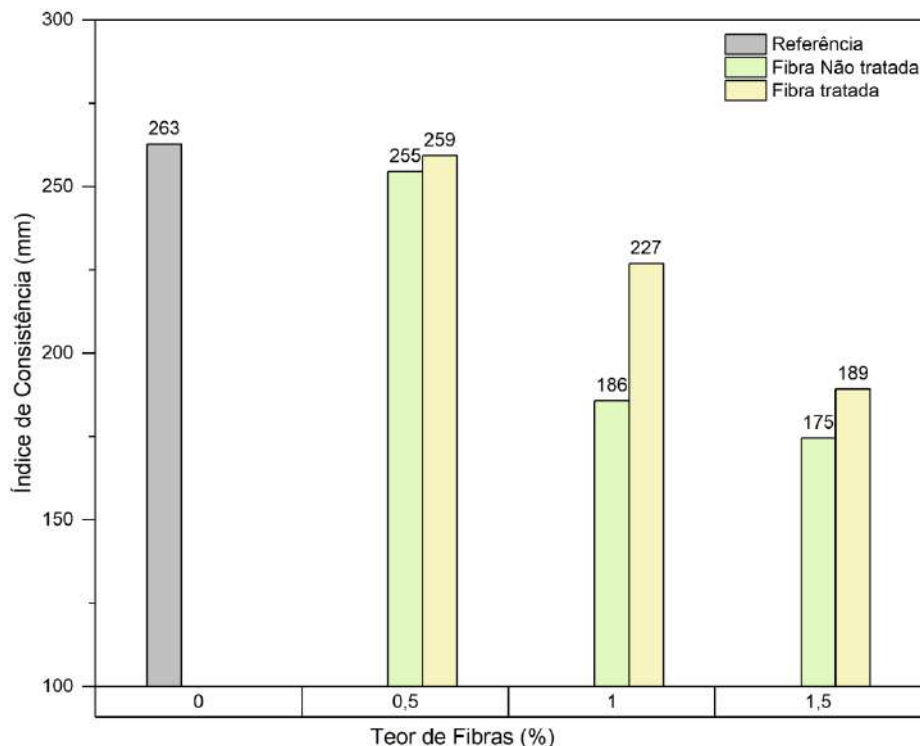
informações úteis que contribuirão para a caracterização reológica das misturas analisadas com relação aos aspectos de fluidez, coesão e tensão de escoamento das misturas.

### 5.2.2.1 Índice de Consistência

De acordo com o Awoyera *et. al* (2022) a consistência é uma característica física fundamental para o desempenho das argamassas. Segundo os autores, a capacidade de absorção de água pelos materiais constituintes e a coesão entre as partículas afeta a trabalhabilidade da mistura, como é o caso das fibras naturais, que têm caráter altamente hidrofílico, utilizadas na produção das argamassas.

O gráfico da Figura 28 traz os dados referentes ao índice de consistência obtido para cada mistura.

**Figura 28 - Índice de Consistência das Misturas**



A NBR 13276 (ABNT, 2016) especifica o método de determinação do índice de consistência de argamassas, até 2016, quando a norma foi atualizada, de acordo com De Aquino *et. al* (2022), havia a recomendação de que as argamassas apresentasse o índice de espalhamento na mesa de consistência igual a  $260 \pm 10$

mm. Para os resultados encontrados nessa pesquisa, para as argamassas com adição de fibras, apenas a mistura com percentual de 0,5% de fibra tratada manteve-se dentro dos limites recomendados. Resultado semelhante foi observado para as misturas com 0,5% da fibra na condição natural, podendo considerá-la também dentro desse limite. Com a atualização da referida norma ocorrida em 2016, esses limites não são mais obrigatórios, no entanto, trata-se um parâmetro importante para avaliação trabalhabilidade das argamassas, na Figura 29 é possível observar o aspecto das misturas produzidas.

**Figura 29** - Ensaios de índice de consistência das misturas analisadas

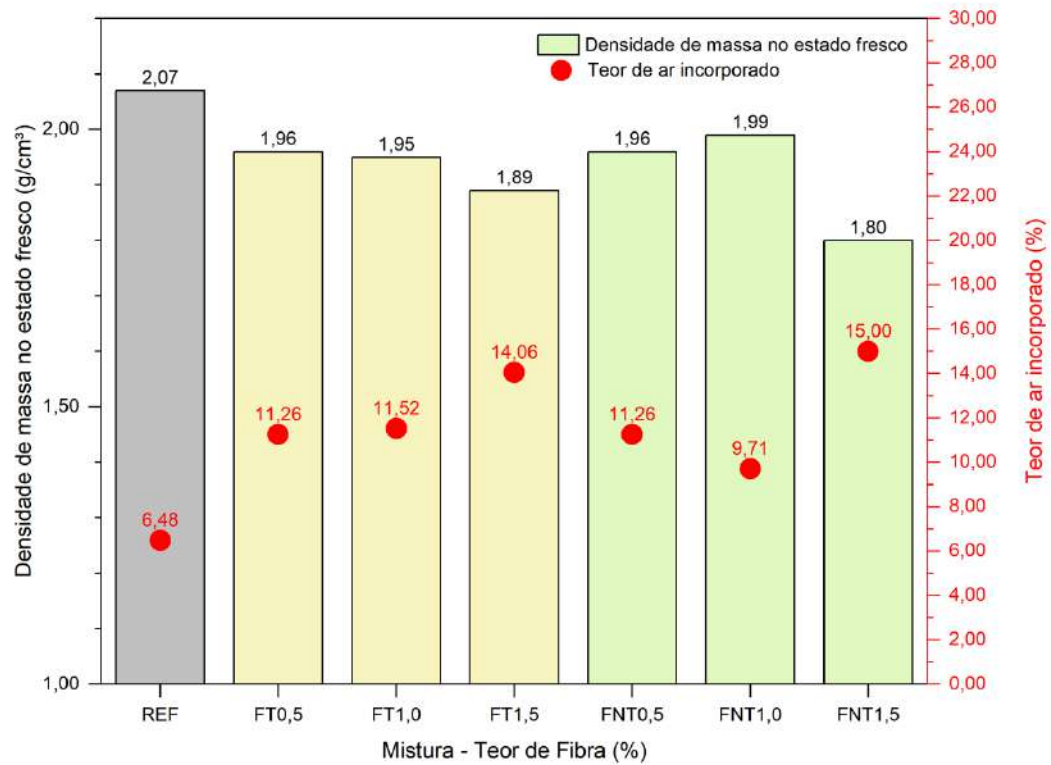


Observou-se que a adição das fibras contribuiu para melhorar a coesão argamassas. Em contrapartida, prejudicou a sua trabalhabilidade, a alta hidrofiliabilidade verificada nos ensaios de caracterização das fibras contribuíram para a absorção da água disponível para a hidratação do cimento e formação da pasta nas argamassas. As misturas com teor de fibras de 1,5% apresentaram acentuada segregação das fibras e exsudação da pasta de cimento.

Quanto à influência do tratamento realizado nas fibras, para o mesmo teor de fibra adicionado verificou-se que melhor trabalhabilidade das argamassas com fibras tratadas. De Azevedo *et. al* (2021) observaram que aplicação de tratamento superficial nas fibras aumentaram a sua rugosidade, contribuindo para a adesão interfacial entre o reforço (fibra) e a matriz (argamassa), favorecendo a ancoragem à matriz e por consequência a redução da fluidez da argamassa. No presente estudo, a adição das fibras contribuiu para a redução da fluidez quando comparada a argamassa de referência. O tratamento aplicado às fibras contribuiu para a remoção da cera presente na superfície da fibra, melhorando o mecanismo de adesão à matriz produzindo uma mistura mais coesa e mais trabalhável com relação as que utilizaram a fibra em sua condição natural. Ressalta-se também que na etapa de caracterização física da fibra foi verificado que o tratamento contribuiu para retardar o processo de absorção de água pela fibra, contribuindo a fluidez do conjunto.

#### **5.2.2.2 Densidade de massa e teor de ar-incorporado**

As fibras vegetais são materiais de baixa densidade quando comparadas aos materiais que compõem as argamassas. Em revisão sobre a adição de fibra de coco em materiais cimentícios, Ali *et. al* (2022) verificou que há um declínio na densidade dos compósitos em função da adição de fibras, isso ocorre porque, nas argamassas, as fibras são incorporadas substituindo-a parcialmente, ocasionando a redução da densidade do compósito formado pelos dois materiais. A análise do gráfico da Figura 30 indica que conforme esperado, todas as argamassas com adição de fibras de carnaúba apresentaram densidade de massa no estado fresco inferior à referência.

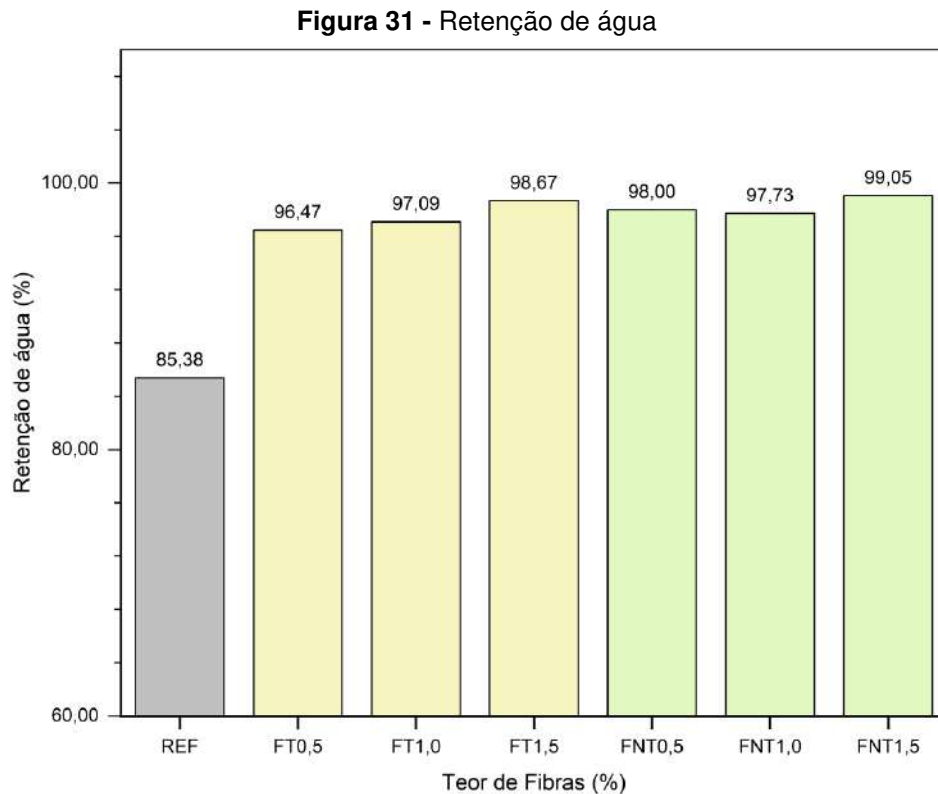
**Figura 30** - Densidade de massa e Teor de ar incorporado

Outra razão para redução da densidade fresca está relacionada ao teor de ar incorporado à mistura, que apresentaram maiores valores conforme o acréscimo na quantidade de fibra adicionada, indicando a presença de vazios no interior da massa fresca.

Conforme Pereira *et. al* (2024) esse acréscimo está relacionado à expansão da zona de interface fibra-matriz onde a adesão não ocorre totalmente ao longo da superfície e onde há absorção da água de amassamento pela fibra, favorecendo a formação de vazios no interior da mistura.

### 5.2.2.3 Retenção de água

A retenção de água é outro parâmetro que se relaciona à trabalhabilidade das argamassas. Conforme o gráfico da Figura 31, todas as argamassas com adição de fibras apresentaram índice de retenção de água superior à referência.



Todos os resultados determinados para o índice de retenção foram superiores a 95%, valores que segundo Pereira *et. al* (2024) são benéfico para as argamassas de revestimento, pois contribuem para a redução do fenômeno de retração por secagem da mistura. Os resultados encontrados podem ser atribuídos ao processo de absorção de água pelas fibras.

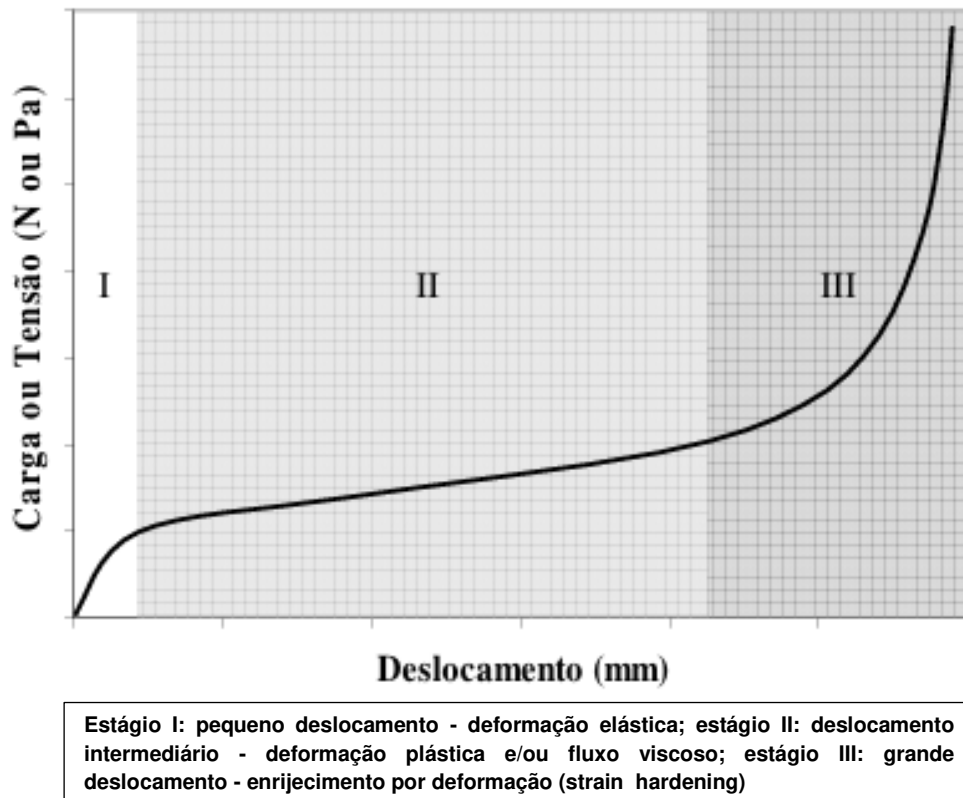
No presente estudo todas as misturas apresentaram retenção de água superior a 75%. De acordo com De Azevedo *et. al* (2020) o total de água retido pode ser prejudicial à adesão da matriz ao substrato, no entanto, salienta-se que no caso das misturas estudadas a água retida encontra-se aderida a fibra e não livre na pasta, impedindo o efeito negativo mencionado pelos autores.

#### 5.2.2.4 Squeeze Flow

O ensaio de squeeze flow consiste na compressão de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas provocando a deformação radial da mistura. De acordo com Cardoso, Pileggi e John (2010) o ensaio contribui para simular as cargas e deformações envolvidas no processo de aplicação das argamassas e compreender o seu comportamento nas etapas de espalhamento,

quando a argamassa é solicitada em altas taxas de cisalhamento e grandes deformações, nivelamento e acabamento, quando o material é submetido a deformações e taxas de cisalhamento variáveis. O perfil típico das curvas de squeeze flow pode ser observado na Figura 32.

**Figura 32** - Perfil típico de do ensaio de squeeze-flow realizado com deslocamento controlado



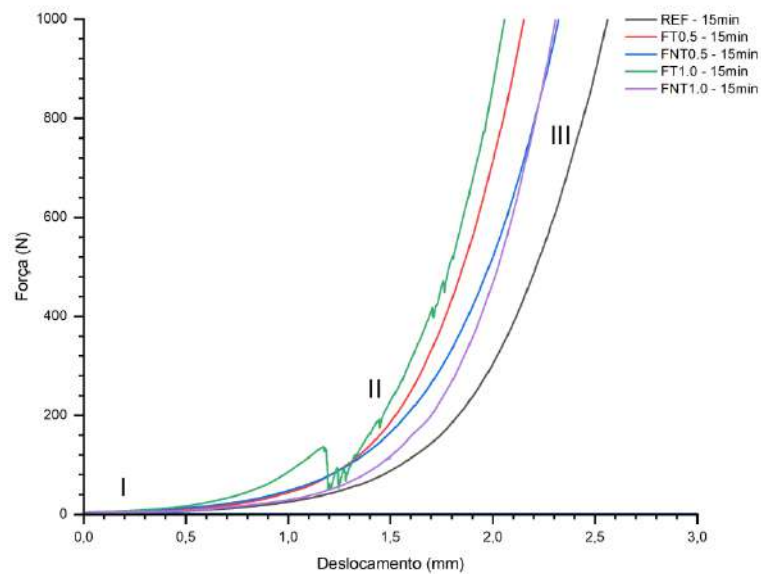
Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2010)

Nesta pesquisa, o comportamento das argamassas foi avaliado nas velocidades de aplicação de carga de 0,1 mm/s nos tempos de 15 min e 65 min após o preparo de cada mistura, e na velocidade de 3,0 mm/s nos tempos de 10 e 50min após o preparo de cada mistura. De acordo Cardoso, Pileggi e John (2010) essas velocidades de aplicação de carga simulam fenômenos de ordem prática.

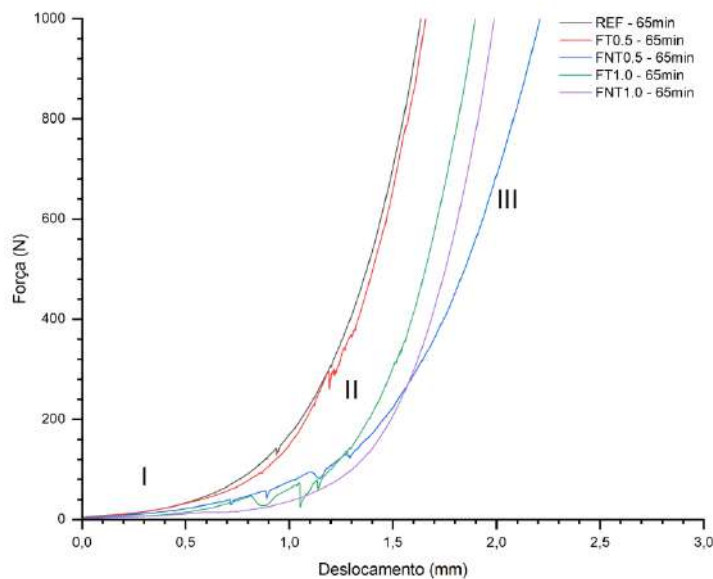
Em razão da pouca trabalhabilidade verificada nos ensaios de consistência, optou-se por não realizar o ensaio nas misturas com adição de 1,5% de fibra.

Os resultados do ensaio com taxa de solicitação igual a 0,1 mm/s estão mostrados no gráfico da Figura 33.

**Figura 33** - Ensaio de Squeeze Flow para taxa de carregamento de 0,1mm/s (a) após 15 min da mistura e (b) após 65min da mistura



(a)



(b)

De acordo com os resultados, na Figura 33.a, para a velocidade de 0,1 mm e 15 min após o preparo das argamassas, a mistura que apresentou as maiores deformações foi a argamassa de referência, a deformação máxima obtida foi de 2,5 mm, a argamassa que apresentou o melhor comportamento plástico característico da zona II foi a REF e FNT1,0 no intervalo de deformação entre de 0,5 mm a 1,0 mm. Analisando o comportamento das misturas na zona III, observou-se que as

cargas máximas foram atingidas mais rapidamente para as argamassas reforçadas com fibras. Comparando as misturas com adição de fibras verificou-se que as que receberam tratamento apresentaram mais resistência ao deslocamento e acréscimo de cargas evidenciando a maior coesão e enrijecimento da mistura, que pode ser relacionada à melhor adesão com das fibras com a matriz.

Para a velocidade de carregamento de 0,1mm e tempo de preparo da mistura de 65 min, mostrados na Figura 33.b a situação se inverteu, a mistura de referência nesse caso apresentou o menor deslocamento máximo, apresentando uma curva muito semelhante à argamassa do tipo FT-0,5%, seguida pela Argamassa FT-1,0, evidenciando pelo aumento das cargas e mudança de perfil após 65 minutos o efeito da consolidação das misturas no decorrer do tempo e a manutenção da coesão da mistura.

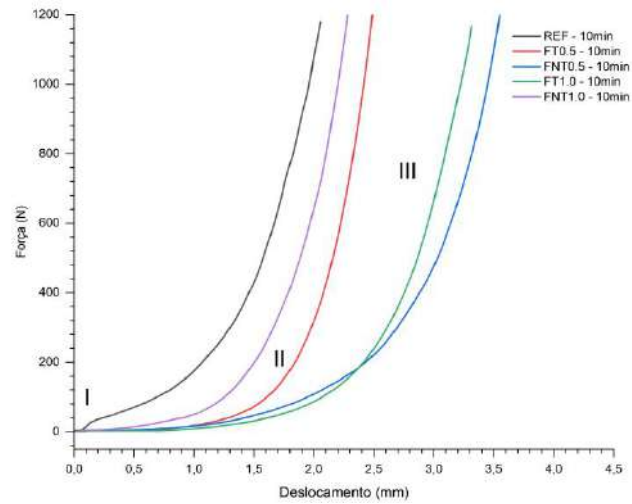
O acréscimo dos deslocamentos observados para as curvas das argamassas FNT 0,5% e FNT1,0%, ocorre devido a redução das cargas necessárias para deformação do material decorrentes de seu rompimento, pois o aumento da viscosidade da pasta e redução da sua capacidade plástica em manter a coesão, conforme Cardoso, Pileggi e John (2010).

Para a taxa de carregamento de 3,0 mm/s, foram obtidos os resultados constantes na

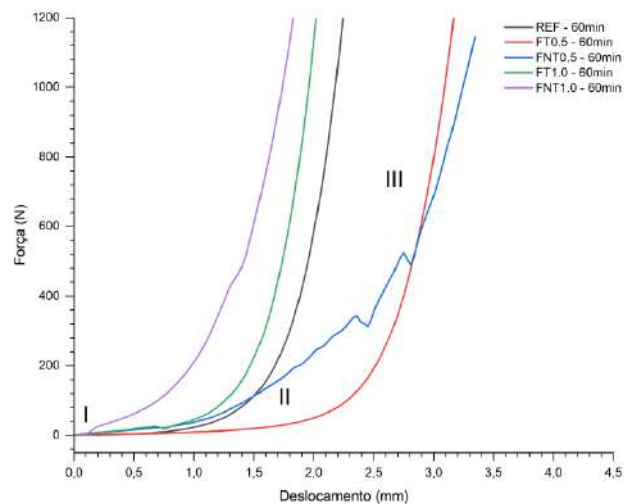
Figura 34. Nesse caso, a tendência observada foi oposta a observada para a taxa de carregamento de 0,1 mm/s, havendo um acréscimo nas cargas necessárias para o deslocamento nos momentos iniciais, os resultados corroboram com os obtidos por Cardoso, Pileggi e John (2005).

Comparando a evolução dos resultados para as idades de 10 min e 60 min, observa-se é possível comparar a influência da adição do teor de fibras analisando o comportamento das argamassas de referência e de com 0,5% de fibra tratada, que aos 10 min após o preparo da mistura apresentaram curvas muito semelhantes, no entanto, o efeito da consolidação da argamassa aos 60 min foi mais acentuado para a argamassa de referência. Analisando os resultados dos quatros gráficos obtidos comprova-se a suscetibilidade do comportamento do material à adição das fibras e ao tratamento aplicado.

**Figura 34** - Squeeze Flow para taxa de carregamento igual a 3,0mm/s (a) após 10 min da mistura e (b) após 60min da mistura



(a)



(b)

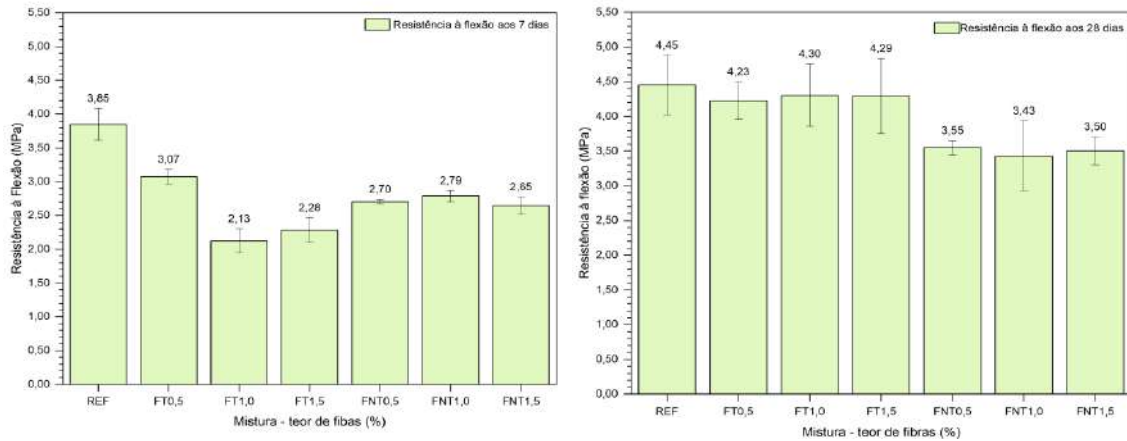
## 5.2.3 Ensaios no Estado Endurecido

### 5.2.3.1 Resistência à tração na flexão e compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão aos 7 e 28 dias estão representados no gráfico da Figura 35 e Figura 36, respectivamente. Os gráficos apresentam a média e barras de erros com o desvio padrão encontrado para cada mistura.

Para a resistência a flexão houve acréscimo das resistências para todas as misturas. Verificou-se também que a ganho de resistência foi maior para as fibras tratadas evidenciando a eficiência do tratamento aplicado na ancoragem à matriz.

**Figura 35** - Resistência à flexão aos 7 e 28 dias



Os testes de análise de variância ANOVA realizados indicaram que para um nível de significância de 5% houve diferença entre as médias das resistências apresentada pelas misturas tanto para os ensaios realizados aos 7 dias com para os ensaios realizados aos 28 dias.

O teste de Tukey foi realizado para realizar a comparação entre as médias obtidas para cada mistura, dois a dois, os resultados mostrados na Tabela 13 através de agrupamento de letras, as médias que não são significativamente diferentes compartilham a mesma letra.

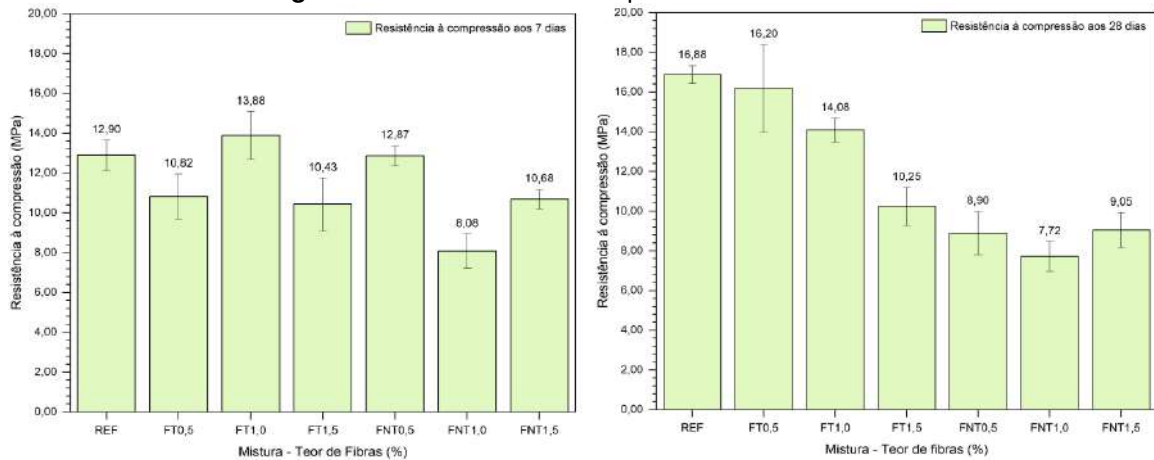
**Tabela 13** - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à flexão das misturas aos 7 e 28 dias

MISTURA	RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 7 DIAS		RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 28 DIAS	
	Média	Grupos	Média	Grupos
REF	3,84	A	4,45	E
FT0,5	3,07	B	4,23	E
FT1,0	2,13		4,30	E
FT1,5	2,28	C	4,29	E
FNT0,5	2,70	B C	3,55	E
FNT1,0	2,79	B	3,43	E
FNT1,5	2,65	B C	3,5	E

Para a resistência à compressão, conforme Figura 36, houve redução na resistência á compressão aos 28 dias das misturas com argamassas não tratadas, o que pode ser indicativo de algum mecanismo de degradação das fibras, conforme também foi observado por De Aquino *et. al* (2023). As argamassas produzidas com

fibras tratadas apresentaram comportamento diferente, nesse caso houve acréscimo da resistência.

**Figura 36 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias**



Os resultados dos ensaios de resistência à compressão também foram tratados por análise estatística, a análise de variância ANOVA indicou que para um nível de significância de 5% houve diferença entre as médias da resistência à compressão apresentada pelas misturas tanto para os ensaios realizados aos 7 dias com para os ensaios realizados aos 28 dias.

O teste de Tukey foi realizado para comparar os as médias obtidas para as argamassas variando o teor de fibras e aplicação do tratamento, dois a dois, os resultados mostrados na

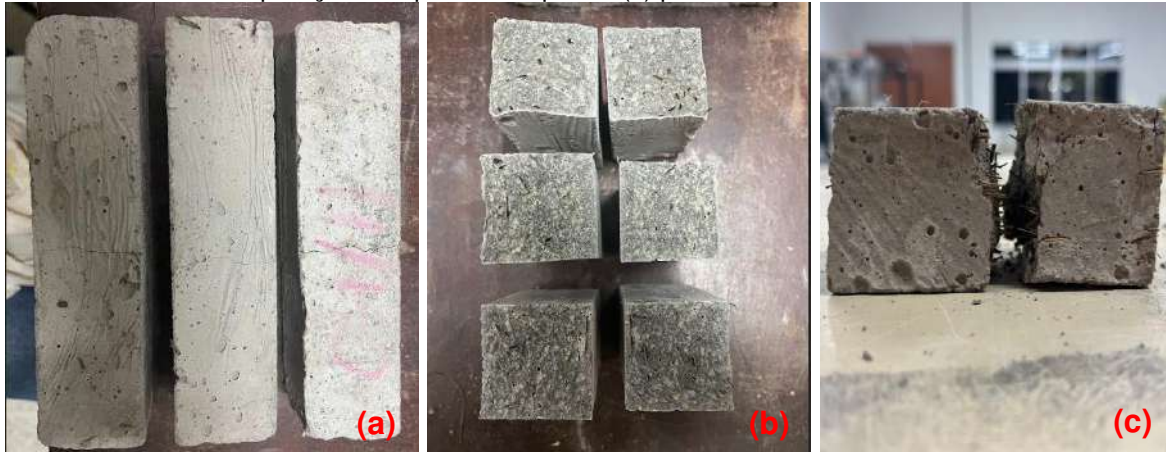
Tabela 14 através de agrupamento de letras, as médias que não são significativamente diferentes compartilham a mesma letra.

**Tabela 14 - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à compressão das misturas aos 7 e 28 dias**

MISTURA	RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 7 DIAS		RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 28 DIAS		
	Média	Grupos	Média	Grupos	
REF	12,9	A	16,9	E	
FT0,5	10,8	A	16,2	E	
FT1,0	13,9	A	14,1	E	F
FT1,5	10,5	A	10,2	F	
FNT0,5	12,8	A	8,9	G	
FNT1,0	8,1	B	7,7	G	
FNT1,5	10,7	A	9,0	G	

No ensaio de flexão foi possível observar que após o rompimento da matriz os corpos de prova mantiveram sua integridade, conforme Figura 37, evidenciando que para as cargas utilizadas no ensaio houve a ruptura da matriz, porém foi mantida a adesão da fibra.

**Figura 37** - Aspecto dos corpos de prova com 1,0% de fibra não tratada (a) após a ruptura (b) após separação das partes rompida e (c) perfil da fratura à flexão



Comparando os resultados obtidos com outros estudos, Eduardo, Nóbrega e Ferreira (2023) verificaram as propriedades mecânicas de resistência à flexão e à compressão de argamassas produzidas com fibras de carnaúba sem tratamento, analisando a influência da variação do teor (3,0% e 5,0%) e comprimento das fibras (20mm, 40mm e 60mm). Os autores observaram que os maiores valores de resistência encontrados foram para as misturas menores teores de fibras com menores comprimentos, conforme também foi observado no presente estudo.

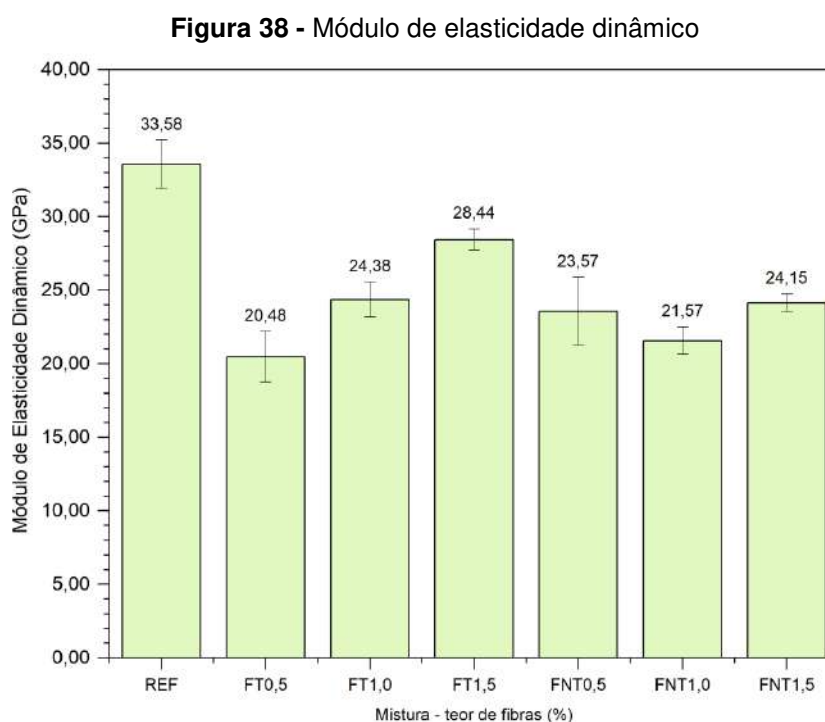
Em argamassas, o volume excessivo de fibras adicionado pode ser prejudicial a resistência mecânica do compósito, conforme Marvila *et. al* (2021) observou que há uma queda na resistência das argamassas com adição de teores de fibras acima de 3,0%, segundo os autores teores elevados de fibra comprometem a molhabilidade do sistema. Awoyera *et. al* (2022) também verificaram que o maior volume de fibras pode induzir a sobreposição do material criando caminhos de falha no compósito cimentício afetando o desempenho mecânico do material sob carga de teste.

O estudo de Santo de Lima *et. al* (2024), que avaliou a influência da adição de fibras de guarumã em argamassas, utilizando o traço e teores de fibra adicionados iguais aos avaliados nessa pesquisa, obteve resultados semelhantes para resistência à compressão e a flexão aos obtidos no presente estudo.

### 5.2.3.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado à capacidade das argamassas absorverem deformações, módulos de elasticidade menores indicam que a argamassa será mais capaz de sem deformar sem sofrer ruptura, conforme explicam Morelo e Vieira (2024), quanto menor for o módulo de elasticidade, maior será a capacidade do compósito de absorver deformações.

A Figura 38 apresenta os valores de módulo de elasticidade determinados para as misturas analisadas. Observa-se que a adição de fibras contribuiu para a redução do módulo de elasticidade, durante o ensaio isso pode ser observado pela redução da velocidade do pulso ultrassônico em argamassa com adição de fibras, resultado semelhante ao encontrado por Mathavan, Sakthieswaran e Babu (2021), também contribuiu para o resultado os menores valores de densidade aparente das argamassas com adição de fibras.



Os resultados do ensaio foram tratados por análise estatística, a análise de variância ANOVA indicou que para um nível de significância de 5% houve diferença entre as médias do módulo de elasticidade dinâmico apresentado pelas misturas. O teste de Tukey comparou as médias obtidas, verificando que todas as misturas com

adição de fibras apresentaram desempenho superior ao encontrado para a argamassa de referência (apresentaram menores valores para o módulo de elasticidade), sendo consideradas equivalentes a misturas: FT0,5%; FT1,0%; FT1,5%, FNT0,5% e FNT1,0, seguidas pela argamassa FNT1,5 e com o pior desempenho a argamassa de referência.

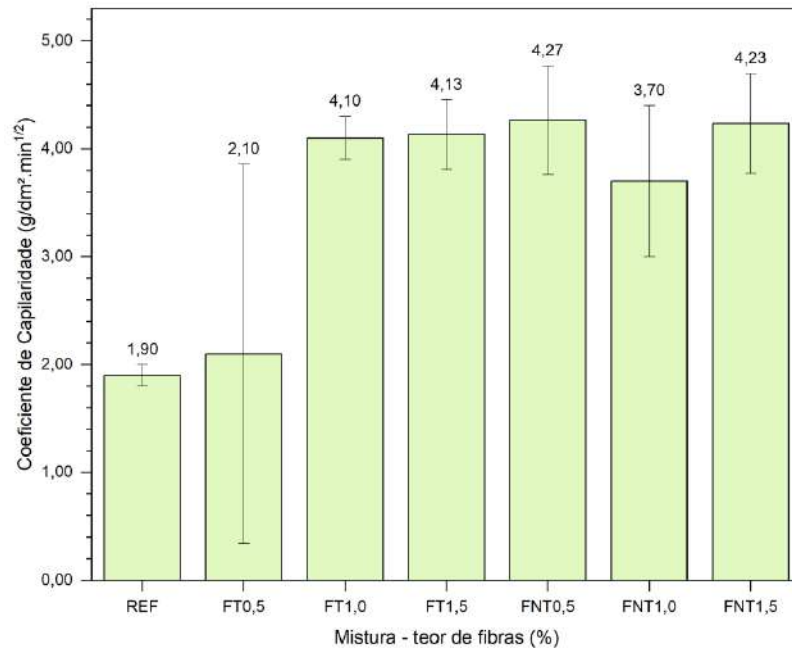
### 5.2.3.3 Absorção por Capilaridade, absorção por Imersão e índice de vazios

As argamassas são um material de característica porosa, conforme imagem da Figura 39 obtida através de microscópio digital com aumento de 400x. Essa característica porosa as torna mais suscetíveis aos fenômenos de capilaridade e absorção de água.

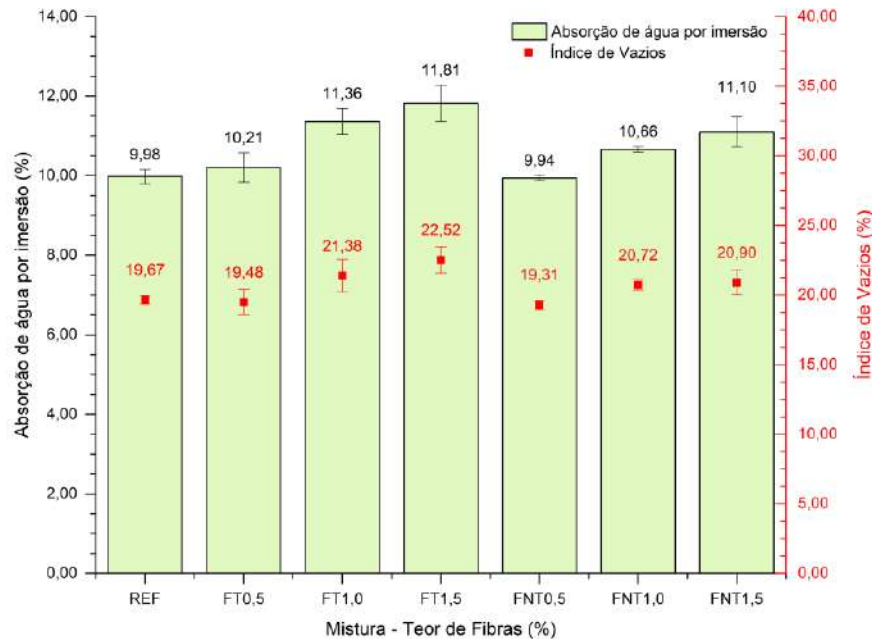
**Figura 39** - Aspecto poroso da argamassa



Santo de Lima (2024) definem a absorção capilar como uma propriedade ligada à intercomunicação dos poros internos que pode causar um fluxo capilar de água ou outros elementos. O gráfico da Figura 40 apresenta os resultados para o coeficiente de absorção por capilaridade obtido para as argamassas neste trabalho, observa-se um acréscimo para as taxas de absorção por capilaridade acompanhado para o acréscimo do teor de fibras.

**Figura 40 - Coeficiente de Absorção por capilaridade**

Os resultados obtidos para a absorção de água por imersão e índice de - desses parâmetros relacionados à adição das fibras, sendo os maiores valores encontrados par adição de 1,5% da fibra em volume, observou-se também que a acréscimo foi maior para as fibras não tratadas, isso pode ser explicado pelo mecanismo de aderência entre a fibra tratada e a argamassa ter ocorrido de forma mais efetiva reduzindo a presença de vazios na interface entre os materiais contribuindo para a formação de um compósito melhor adensado.

**Figura 41** - Absorção por imersão e índice de vazios

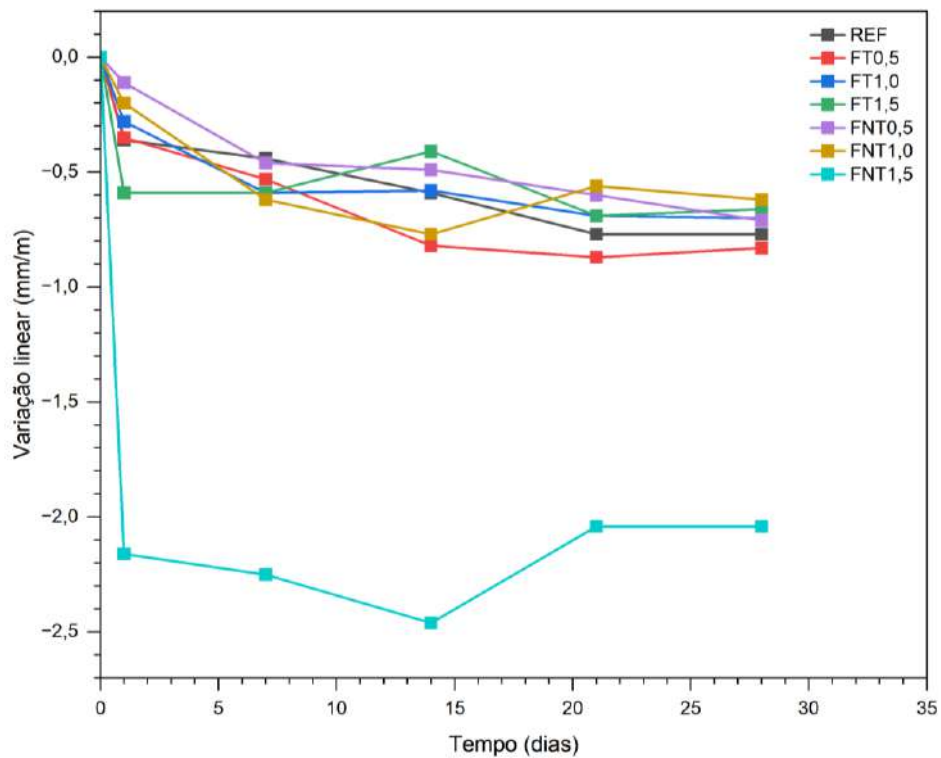
Comparado a outros estudos os resultados foram melhores que os verificados por De Aquino *et. al* (2023) para argamassa reforçadas com fibra da palha do milho e aos obtidos por Santo de Lima *et. al* (2024) para as fibras de guarumã.

#### 5.2.3.4 Variação Dimensional (retração ou expansão linear)

Os resultados do ensaio de variação diametral indicaram que todas as misturas analisadas apresentaram o fenômeno da retração, conforme observado na Figura 42.

A análise do gráfico permite observar que todas as argamassas com exceção da FNT1,5 apresentaram valores inferiores 0,8mm/m aos recomendados pela NBR 13281 (2023) para argamassas de revestimento.

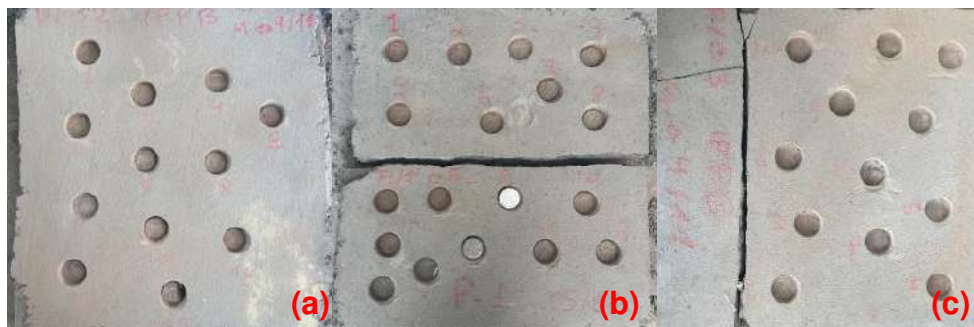
Realizando uma comparação entre as misturas com adição de fibras observa-se que os corpos de prova com menor retração foram produzidos com fibra não tratada.

**Figura 42 - Variação dimensional das argamassas**

### 5.2.3.5 Resistência de aderência à tração

O ensaio foi realizado para as misturas REF%, FT0,5% e FNT0,5%, que para o fator de a/c adotado para as apresentaram as condições de trabalhabilidade desejáveis. As imagens apresentam os padrões de rompimento observados durante a realização do ensaio. a

A Figura 43, mostra os painéis produzidos onde foram realizados a o ensaios de resistência aderência ao substrato.

**Figura 43 – Painéis revestidos com argamassa (a) referência (b) FNT0,5% (c) FT0,5%**

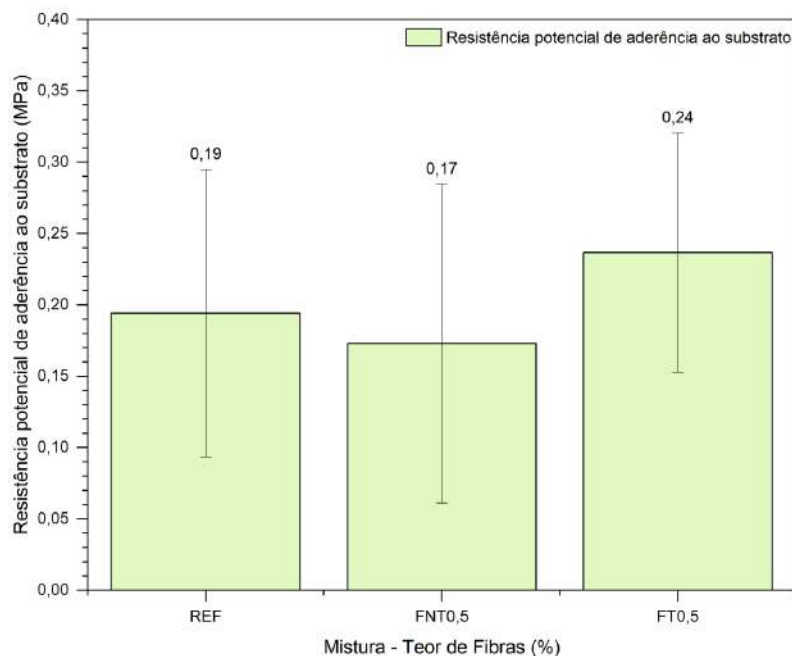
A Tabela 15 apresenta os resultados da inspeção visual realizada após a realização do ensaio para verificação da forma de ruptura observada e a respectiva frequência, também está registrada a resistência calculada para cada argamassa testada.

**Tabela 15 - Resistência de aderência à tração e formas de ruptura**

REVESTIMENTO	RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA	FORMA DE RUPTURA						
		Substrato	Substrato chapisco	Chapisco	Chapisco/argamassa	argamassa	argamassa/cola	cola/pastilha
FNT0,5%	0,17±0,11%	-	8,3%	16,7%	-	66,7%	-	8,3%
REF	0,19±0,10%	-	33,3%	16,7%	-	50,0%	-	-
FT0,5%	>0,24±0,08%	-	0,7%	0,3%	-	-	-	-

Os resultados da média e desvio padrão obtido para cada argamassa estão apresentados no gráfico da Figura 44.

**Figura 44 - Resultados do Ensaio de Aderência ao substrato**



Com base nos resultados obtidos verificou-se que a mistura com melhor resistência de aderência a tração foi a argamassa reforçada com fibras tratadas – FT0,5, apresentando resultados superiores a mistura de referência e a argamassa com fibras não tratadas, que apresentou o pior desempenho. A inspeção visual realizada para análise da forma de ruptura verificada para cada corpo de prova

reforça essa constatação, pois para as a mistura com fibras não tratadas predominou o rompimento no interior da argamassa, que com base em outros resultados da pesquisa e pela presença da cera existente naturalmente na superfície da fibra contribuem para o enfraquecimento da sua adesão com a matriz. Em contrapartida para as fibras com tratamento predominou a ruptura na interface do chapisco (realizado sem adição de fibras), para nenhum dos corpos de prova houve ruptura no interior da argamassa, o que evidencia que a resistência à aderência calculada corresponde à tensão de ruptura do chapisco, e a resistência da argamassa superior. Quanto à sua classificação e adequação às exigências normativas o valor encontrado para a mistura FT0,5 (argamassa com adição de fibra tratada no teor de 0,5%) está no intervalo entre 0,2 MPa e 0,3 MPa, exigido pela NBR 13281 (ABNT, 2023) para aplicação em revestimentos internos e externos respectivamente.

## 6 CONCLUSÕES

Os ensaios e análises realizados no decorrer deste trabalho possibilitaram realizar a caracterização das fibras de carnaúba nos aspectos físicos, químico e mecânico e caracterizar as argamassas produzidas com as fibras nas condições natural (sem tratamento) e tratada (tratamento alcalino com  $\text{CaOH}_2$ ), contribuindo para as pesquisas sobre aplicação de fibras naturais em matérias cimentícios e sobre o aproveitamento das fibras de carnaúba como material de engenharia.

Quanto às fibras de carnaúba, foi verificada a afetividade do tratamento alcalino com  $\text{CaOH}_2$  na promoção de alterações na estrutura da fibra verificados pelo acréscimo do índice de cristalinidade, alteração no comportamento térmico da fibra que evidenciou a redução dos teores de hemicelulose e lignina, modificação da resistência à degradação térmica, também verificou-se alterações nas propriedades mecânicas com redução da resistência à tração e alongamento máximo da fibra.

Na avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco, a adição de fibras reduziu a trabalhabilidade e favoreceu a coesão das misturas.

Com relação às propriedades no estado endurecido, para a resistência à flexão e à compressão todos os resultados apresentaram valores acima do recomendado pela norma brasileira específica para argamassas de revestimento. A

adição das fibras contribuiu para redução do módulo de elasticidade reduzindo a rigidez quando comparada à argamassa de referência, indicando que as fibras atuam melhorando a capacidade de compósito absorver as deformações sem sofrer ruptura.

Quanto à avaliação da resistência à aderência superficial, a argamassa FT0,5% apresentou melhores resultados que a argamassa com fibras não tratadas no mesmo teor e que a argamassa de referência, sem adição de fibras, ressaltando a eficácia do tratamento aplicado as fibras.

Considerando os resultados obtidos a respeito das propriedades das fibras e das argamassas, constata-se a possibilidade de aplicação das fibras de carnaúba como material de reforço para argamassas de revestimento e da aplicação do tratamento com  $\text{CaOH}_2$  que contribuiu para melhorar as propriedades de trabalhabilidade e aderência entre às fibras e a matriz cimentícia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, Jawad; ZHOU, Zhiguang. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: a review. **Construction and Building Materials**. v. 333, p. 127353, 2022.
- ALCIVAR-BASTIDAS, S.; PETROCHE, Daniel M.; MARTINEZ-ECHEVARRIA, M. J. The effect of different treatments on abaca fibers used in cementitious composites. **Journal of Natural Fibers**. v. 20, n. 1, p. 2177235, 2023.
- ALI, Babar et. al A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials. **Construction and Building Materials**. v. 351, p. 128957, 2022.
- ALSHAYA, N. et. al The use of plant-based natural fibers in reinforced cement composites. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. v. 12, n. 5, p. 557-565, 2018.
- ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1557 - Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers**. ASTM International, 2014.
- ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2654 - Standard Test Methods for Moisture in Textiles**. ASTM International, 2022.
- AWOYERA, Paul O. et. al Development of Fibre-Reinforced Cementitious Mortar with Mineral Wool and Coconut Fibre. **Materials**. v. 15, n. 13, p. 4520, 2022.
- AZEVEDO, Afonso et. al Rheology, hydration, and microstructure of portland cement pastes produced with ground açai fibers. **Applied Sciences**. v. 11, n. 7, p. 3036, 2021.
- AZEVEDO, Afonso RG et al. Guaruman fiber: A promising reinforcement for cement-based mortars. **Case Studies in Construction Materials**. v. 16, p. e01029, 2022.
- BIZERRA, Deiby et. al Carnauba Straw as Feedstock for Solid Biofuel Production. **Advances in Environmental and Engineering Research**. v. 4, n. 3, p. 1-13, 2023.
- CAO, Mingli; XU, Ling; ZHANG, Cong. Rheological and mechanical properties of hybrid fiber reinforced cement mortar. **Construction and Building Materials**. v. 171, p. 736-742, 2018.
- CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow**. ANAIS, Florianópolis, VI SBTA, p. 121-143, 2005.
- CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, v. 1, p. 1-29, 2010.
- DA SILVA, Francinaldo Leite et. al Evaluation of blend production of cellulases and xylanases Using pretreated and recycled carnauba straw. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. p. 1-13, 2022.
- DA SILVA, Francinaldo Leite et. al Pretreatments of Carnauba (*Copernicia prunifera*) straw residue for production of cellulolytic enzymes by *Trichoderma reesei* CCT-2768 by solid state fermentation. **Renewable Energy**. v. 116, p. 299-308, 2018.
- DA SILVA, Francinaldo Leite et. al Valorization of an agroextractive residue—Carnauba straw—for the production of bioethanol by simultaneous saccharification and fermentation (SSF). **Renewable Energy**. v. 127, p. 661-669, 2018.
- DA SILVA, Tulane Rodrigues et al. A review on the performance of açai fiber in cementitious composites: Characteristics and application challenges. **Journal of Building Engineering**. v. 71, p. 106481, 2023.

- DA SILVEIRA, Pedro Henrique Poubel Mendonça *et. al.* Amazon Natural Fibers for Application in Engineering Composites and Sustainable Actions: A Review. *Eng.* v. 5, n. 1, p. 133-179, 2024.
- DE ALMEILDA, José Afonso Santana *et. al.* Use, perception, and local management of Copernicia prunifera (Miller) HE Moore in rural communities in the Brazilian Savanna. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine.** v. 17, p. 1-13, 2021.
- DE AQUINO, Luiz Arthur Silva *et. al.* Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime. **Construction and Building Materials.** v. 353, p. 129111, 2022.
- DE AZEVEDO, Afonso RG *et. al.* Investigation of the Potential Use of Curauá Fiber for Reinforcing Mortars. **Fibers.** v. 8, n. 11, 2020.
- DE AZEVEDO, Afonso RG *et. al.* Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. **Journal of Building Engineering.** v. 33, p. 101675, 2021.
- DE OLIVEIRA LIBÓRIO DOURADO, João Batista *et al.* Babassu Fibers as Green Mortar Additives. *Journal of Natural Fibers*, v. 20, n. 2, p. 2256471, 2023.
- DE PELLEGRIN, M. Z.; ACORDI, J.; MONTEDO, O. R. K. Influence of the length and the content of cellulose fibers obtained from sugarcane bagasse on the mechanical properties of fiber-reinforced mortar composites. **Journal of Natural Fibers.** 2019.
- EDUARDO, Antunes França; NÓBREGA, Marcilene Vieira de; FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva. Evaluation of the behavior of mortars produced with fibers from the straw of carnauba: effects of the content of addition and length used. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.
- FERNANDES, Jéssica Emanuela *et. al.* Carnauba straw: Characterization and chemical treatments. **Journal of Applied Polymer Science.** v. 122, n. 3, p. 1614-1621, 2011.
- FERREIRA, Saulo Rocha *et. al.* Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials.** v. 101, p. 730-740, 2015.
- FORNARI JR, C. C. M. Fibras vegetais para compósitos poliméricos. **Ilhéus: Editus,** 2017.
- GUIMARÃES, Pompeu Paes *et. al.* Produtos florestais não madeireiros do nordeste brasileiro: carnaúba. **Nativa.** v. 6, n. 2, p. 213-218, 2018.
- JUNIO, Raí Felipe Pereira *et. al.* Carnauba leaf fibers: correlation among diametrical variation, physical and mechanical properties. **Journal of Materials Research and Technology.** v. 22, p. 1888-1899, 2023.
- JUNIO, Raí Felipe Pereira *et. al.* Copernicia prunifera leaf fiber: A promising new reinforcement for epoxy composites. **Polymers.** v. 12, n. 9, p. 2090, 2020.
- JUNIO, Rai Felipe Pereira *et. al.* Thermochemical and structural characterization of promising carnauba novel leaf fiber (Copernicia prunifera). **Journal of Materials Research and Technology.** v. 18, p. 4714-4723, 2022.
- KHAN, Mehran; REEHMAN, Abdul; ALI, Majid. Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road. **Construction and Building Materials.** v. 244, p. 118382, 2020.
- KIM, Jun Tae; NETRAVALI, Anil N. Mercerization of sisal fibers: effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites. **Composites Part A: Applied science and manufacturing.** v. 41, n. 9, p. 1245-1252, 2010.
- LIMA, Rafael Nogueira *et. al.* Investigation of the potential of the carnauba stalk and of the carnauba's straw to use as biofuel. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, 2019.

- MARVILA, Markssuel Teixeira *et. al* Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. **Innovative Infrastructure Solutions**. v. 6, p. 1-24, 2021.
- MATHAVAN, M.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, O. Ganesh. Experimental investigation on strength and properties of natural fibre reinforced cement mortar. **Materials Today: Proceedings**. v. 37, p. 1066-1070, 2021.
- MELO, José Daniel Diniz *et. al* A biodegradable composite material based on polyhydroxybutyrate (PHB) and carnauba fibers. **Composites Part B: Engineering**. v. 43, n. 7, p. 2827-2835, 2012.
- MORELO, Luciana Paula Tessaro; VIEIRA, Geilma Lima. Análises mecânicas e de durabilidade em argamassas produzidas com baixo teor de cimento. **Ambiente Construído**, v. 24, p. e130856, 2024.
- NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2016
- NBR 13277. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13280. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.
- NBR 13281-1. **Requisitos e métodos de ensaios – Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2023.
- NBR 13281-2. **Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenarias**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2023.
- NBR 15259. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 15261. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 15630. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2008.

- NBR 15839. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – caracterização reológica pelo método squeeze-flow**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2010.
- NBR 16605. **Determinação da massa específica do cimento**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2017.
- NBR 16916. **Agregado Miúdo - Densidade e Absorção**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2017.
- NBR 16972. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.
- NBR 17054. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.
- NBR 7211. **Agregados para concreto – Requisitos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.
- NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- PEREIRA, lully da Silva Amaral *et. al* Evaluation of the potential of treatments by NaOH and tannic acid of pineapple leaf (*Ananas comosus*) fiber used as reinforcement in coating mortars. **Journal of Building Engineering**. v. 95, p. 110234, 2024.
- PEREIRA, Jéssyca ES *et. al* Valorization of carnauba straw and cashew leaf as bioadsorbents to remove copper (II) ions from aqueous solution. **Environmental Technology & Innovation**. v. 23, p. 101706, 2021.
- PNUD. 2012. **Carnaúba Viva**, Brazil. Equator Initiative Case Study Series. New York, NY
- PRIYADHARSHINI, S.; RAMAKRISHNA, G. A novel approach for the rheological behaviour of polymer modified untreated and treated sisal fibre reinforced cement mortar composites. **Materials Today: Proceedings**. v. 5, n. 5, p. 12927-12939, 2018.
- QUEIROGA, V. P. ; ASSUNCAO, M. V. ; ALMEIDA, F. A. C. ; ALBUQUERQUE, E. M. B. . **Carnaubeira: Tecnologias de Plantio e Aproveitamento Industrial**. 2. ed. Campina Grande: ASSOCIAÇÃO DA REVISTA ELETRÔNICA A BARRIGUDA - AREPB- Revista Barriguda, 2017. v. 1. 260p .
- RAHMAN, M. Mizanur; KHAN, Mubarak A. Surface treatment of coir (*Cocos nucifera*) fibers and its influence on the fibers physico-mechanical properties. **Composites science and technology**. v. 67, n. 11-12, p. 2369-2376, 2007.
- SANTO DE LIMA, Thuany Espirito *et. al* Potentiality of using guarumã natural fiber (*Ischinosiphon koern*) in sustainable coating mortars. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 30, p. 1301-1309, 2024.
- SEGAL, LGJMA *et. al* An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile research jornal**. v. 29, n. 10, p. 786-794, 1959.
- SURNAM, B. Y. R.; IMRITH, G. Investigation on the mechanical properties of coconut leaf stalk fibres reinforced composites. **Journal of Natural Fibers**. v. 20, n. 2, p. 2198276, 2023.
- THANUSHAN, Kirupairaja; SATHIPARAN, Navaratnarajah. Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks. **Materialia**. v. 21, p. 101309, 2022.

VAISHNAVI, M. *et. al* Strength and workability characteristics of coir and nylon fiber reinforced self-compacting mortar. **Materials Today: Proceedings**. v. 46, p. 4696-4701, 2021.

VIEIRA, S. **Análise de Variância (ANOVA)**. São Paulo: Editora Atlas, 2006.

VIVEK, Subramanian Shanmugapuram; PRABALINI, Chandrasekaran. Experimental and microstructure study on coconut fibre reinforced self compacting concrete (CFRSCC). **Asian Journal of Civil Engineering**. v. 22, p. 111-123, 2021.

WANI, Tawfeeq Ahmad; GANESH, S. Study on fresh properties, mechanical properties and microstructure behavior of fiber reinforced self compacting concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**. 2022.

ZHAO, Chenggong *et. al* Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview. **Construction and Building Materials**. v. 365, p. 130075, 2023.

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

V817e Virginio, Itamira Raquel Santos.

O efeito adição da fibra da folha da carnaúba (Copernícia prunífera) como reforço em argamassas de revestimento / Itamira Raquel Santos Virginio. - João Pessoa, 2024.

98 f. : il.

Orientação: Renate Maria Ramos Wellen.

Coorientação: Marcos Alyssandro dos Anjos.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Fibras vegetais. 2. Argamassas de revestimento.  
3. Carnaúba - Copernícia prunífera. I. Wellen, Renate Maria Ramos. II. Anjos, Marcos Alyssandro dos. III. Título.

UFPB/BC

CDU 677.1/.2(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**O EFEITO ADIÇÃO DA FIBRA DA FOLHA DA CARNAÚBA (*Copernícia  
prunífera*) COMO REFORÇO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO

Orientadora: Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen  
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

João Pessoa, PB.  
Dezembro de 2024

ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO

**O EFEITO ADIÇÃO DA FIBRA DA FOLHA DA CARNAÚBA (*Copernícia  
prunífera*) COMO REFORÇO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen  
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

João Pessoa, PB.  
Dezembro de 2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Ata da defesa de dissertação de mestrado apresentada pela aluna ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO, no dia 19 de dezembro de 2024.

Às dez horas do dia 19 de dezembro de 2024, na sala de aula do Laboratório de Solidificação Rápida, no Centro de Tecnologia, reuniram-se os membros da banca examinadora composta pelos Professores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> RENATE MARIA RAMOS WELLEN (Presidente, Orientadora); Prof. Dr. MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS (Co-orientador); Prof. Dr. RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA (Examinador Interno) e Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES (Examinador Externo ao Programa), a fim de avaliarem a dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, com título "O EFEITO ADIÇÃO DA FIBRA DA FOLHA DA CARNAÚBA (Copernícia nucifera) COMO REFORÇO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO" de autoria da aluna ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO, matrícula 20221015639. A reunião foi aberta pelo Presidente da banca, que deu início aos trabalhos autorizando a candidata a iniciar sua apresentação. Concluídos os trabalhos de apresentação e de arguição, a Comissão Examinadora emitiu o seguinte parecer:

<p>A discente defendeu a dissertação de mestrado dentro do limite de tempo previamente definido e respondeu satisfatoriamente às arguições da banca. As sugestões da banca serão acatadas e inseridas no documento final dentro do prazo definido pelos membros da banca de 60 (sessenta) dias.</p>
---

A aluna é obrigada a realizar as sugestões da banca. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora além da referida discente que apresentou a defesa de seu mestrado.



Documento assinado digitalmente

**RENATE MARIA RAMOS WELLEN**

Data: 27/12/2024 10:10:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> RENATE MARIA RAMOS WELLEN  
(Presidente, Orientadora)



Documento assinado digitalmente

**MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS**

Data: 26/12/2024 18:56:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS  
(Co-orientador)



Documento assinado digitalmente

**RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA**

Data: 20/12/2024 17:51:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA  
(Examinador Interno)



Documento assinado digitalmente

**SANDRO MARDEN TORRES**

Data: 19/12/2024 15:47:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES  
(Examinador externo ao Programa)



Documento assinado digitalmente

**ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO**

Data: 27/12/2024 13:07:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

ITAMIRA RAQUEL SANTOS VIRGINIO  
(Discente)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sua imensa bondade e por conceder todas as conquistas que realizei em minha vida, colocando em meu caminho as pessoas maravilhosas que me auxiliaram nessa jornada.

Aos meus queridos pais Tânia e Edson (*in memoriam*) pelo amor e apoio incondicional que dedicaram a mim em tudo que me propus a realizar.

Ao meu noivo, Waldeir, por todo o amor, carinho, paciência, companheirismo, incentivo e dedicação, por ser meu porto seguro não me deixando desistir em meus momentos de dúvida e insegurança.

A minha orientadora, Professora Dra. Renate Maria Ramos Wellen, por todos os ensinamentos transmitidos, oportunidade de aprendizagem, paciência, confiança e por não desistir de mim.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Marcos Alyssandro dos Anjos, com quem aprendo mais a cada conversa, pela disposição em contribuir desde o início com a definição do tema da pesquisa, pelas sugestões valiosas e pela acolhida no laboratório de materiais do IFPB, fundamentais para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Aos meus irmãos Ingrid, Igor e Ítalo, pelo incentivo e por compartilharem comigo todos os momentos.

A amiga Pollyane Barros pela disposição em ajudar na aquisição das fibras que permitiram a realização desse trabalho e aos amigos Janaina, William, Isabel e Wigna, sempre presentes contribuindo no corte das fibras.

Ao amigo, Sergio da Silva Júnior, bolsista do projeto de pesquisa em impressão 3D do IFPB, sua colaboração e dedicação durante toda a pesquisa foram fundamentais.

Aos amigos da Diretoria de Obra e Engenharia do IFPB e do prédio da PROEXC do IFPB (Vinicius, Renan, Pablo, Janaina, Mel, Naíza, Joabe, Joyce, Vagner, Hilner, Amando, Diego, José Carlos, Gevânio, Bárbara, Socorro e Erika), pelo apoio oferecido na convivência diária e palavras de incentivo.

Aos técnicos Clésio Luiz, do laboratório de Síntese e Caracterização de Polímeros - LSCP, Ginneton, do Laboratório de Combustíveis e Materiais - LACOM, e Breno Andrade, do Laboratório de Solidificação Rápida - LSR, pela atenção e disposição em ajudar na realização das análises.

Ao Instituto Federal da Paraíba, pela disponibilização dos laboratórios e espaços da instituição para realização da pesquisa, especificamente aos técnicos Gracy Kelly Vasconcelos e Américo Bertulino, da Unidade Acadêmica I pela contribuição na realização dos ensaios.

A Universidade Federal da Paraíba e ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais por possibilitarem que eu desse mais esse passo na minha formação acadêmica, em especial ao Coordenador do Programa Prof. Dr. Daniel Macêdo e aos secretários Karla e Fernando, sempre dispostos a ajudar com eficiência e disposição.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O aproveitamento de fibras vegetais como material de engenharia em substituição a materiais produzidos artificialmente é uma abordagem que tem sido usada para superar as questões ambientais relacionadas à geração de resíduos e ao uso de matérias-primas renováveis. No campo da construção civil as fibras vegetais podem ser utilizadas como reforço de materiais cimentícios para melhorar propriedades como a tenacidade e ductilidade, no entanto, a aplicação das fibras para este fim encontra limitações associadas à heterogeneidade, à alta hidrofiliabilidade e à instabilidade da fibra quando submetida ao meio alcalino. A Carnaúba é uma palmeira nativa da região Nordeste do Brasil, objeto de pesquisas em diversas áreas, todavia, sua aplicação em materiais cimentícios ainda é pouco explorada na literatura. Nesse estudo investigou-se o efeito da adição da fibra da folha da carnaúba como reforço para argamassas de revestimento, variando o teor de fibras e a aplicação de pré-tratamento alcalino com solução de  $\text{CaOH}_2$ . As fibras foram caracterizadas quanto aos aspectos físicos, térmicos e mecânicos, também foram realizadas análises de FTIR e DRX. As fibras foram adicionadas à argamassas de cimento e areia com proporção de 1:3 em massa, no teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Foi realizada a caracterização dos compósitos obtidos no seu estado fresco e no estado endurecido utilizando como parâmetros os ensaios estabelecidos na norma NBR 13281/2023. Os resultados indicaram que a adição de fibras reduziu a fluidez das argamassas e favoreceu a coesão das misturas. A resistência à tração na flexão e à compressão mantiveram os valores semelhantes aos encontrados para a argamassa de referência, reduziram o módulo de elasticidade, indicando que as fibras atuam melhorando a capacidade absorver as deformações sem que ocorra a ruptura do material. Verificou-se que as argamassas com adição de fibras apresentaram valores de retração inferiores à argamassa de referência e ao limite máximo de 0,8mm/m estabelecido pela norma brasileira, com exceção da argamassa com fibras não tratada no teor de 1,5%. Quanto à avaliação da resistência à aderência superficial, para o mesmo teor de fibras, a argamassa com fibras tratadas apresentou resultado superior quando comparada à argamassa com fibra não tratada e à argamassa de referência.

**Palavras-chave:** Carnaúba. Fibras vegetais. Argamassas de revestimento.

## ABSTRACT

The use of plant fibers as engineering materials to replace artificially produced materials is an approach that has been employed to address environmental issues related to waste generation and the use of renewable raw materials. In construction industry, plant fibers can be used as reinforcement in cementitious materials to improve properties such as toughness and ductility. However, the application of fibers for this purpose has limitations associated with heterogeneity, high hydrophilicity and fiber instability when exposed to alkaline environment. The Carnaúba is a palm tree native to the Northeast region of Brazil and the subject of research in various fields. However, its application in cementitious materials is still scarcely explored in the literature. This study investigated the effect of adding carnauba leaf fiber as reinforcement for coating mortars, varying the fiber content and the application of alkaline pretreatment with  $\text{CaOH}_2$  solution. The fibers were characterized in terms of physical, thermal and mechanical aspects, FTIR and XRD analyses were also performed. The fibers were added to cement and sand mortars in a 1:3 mass ratio, at 0.5%, 1.0% and 1.5% contents. The composites were characterized in fresh and hardened states using the tests established by standard NBR 13281/2023. The results indicated that adding fibers reduced the flowability of mortars and enhancing the cohesion of mixtures. The Flexural tensile strength and compressive strength remained similar to reference mortar, but the modulus of elasticity decreased, suggesting that fibers improved the material's ability to absorb deformations without breaking. It was observed that mortars with added fibers showed lower shrinkage compared to the reference mortar and to maximum limit of 0.8 mm/m established by brazilian standard, except untreated fiber mortar with 1.5% fiber content. Regarding the evaluation of surface adhesion strength, for same fiber content, the mortar with treated fibers showed superior results compared to mortar with untreated fibers and reference mortar.

**Keywords:** Carnauba. Plant Fibers. Coating mortars.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das Fibras .....	16
Figura 2 - Estrutura química dos principais constituintes das fibras vegetais .....	18
Figura 3 - Estrutura das fibras vegetais.....	19
Figura 4 - Curva Granulométrica da Areia.....	33
Figura 5 – Fluxograma do Programa Experimental.....	34
Figura 6 – Etapas do Processo de beneficiamento das fibras de carnaúba.....	34
Figura 7 - Etapas do processo de tratamento das fibras (a) Pesagem das fibras (b) solução usada (c) recipiente com as fibras prontas para imersão (d) secagem em estufa .....	35
Figura 8 - Aspecto da fibra moída em peneira com abertura 30MESH (a) antes e (b) após aplicação do tratamento .....	36
Figura 9 - Determinação da massa específica das fibras.....	37
Figura 10 - Determinação do diâmetro médio das fibras.....	41
Figura 11 - Ensaio do índice de Consistência realizado para dosagem da argamassa .....	43
Figura 12 - Procedimento de verificação do índice de consistência.....	47
Figura 13 - Aplicação da Sucção ao prato cheio de argamassa .....	48
Figura 14 - Execução do Ensaio de Squeeze Flow .....	50
Figura 15 - Máquina Universal de Ensaio montada para execução dos ensaios de Flexão .....	51
Figura 16 - Ensaio de compressão axial .....	52
Figura 17 - Execução do Ensaio de Ultrassom .....	54
Figura 18 - Ensaio de Absorção por capilaridade.....	56
Figura 19 - Medidas dos corpos de prova no ensaio de retração.....	59
Figura 20 - Painéis confeccionados para execução do ensaio de resistência de aderência superficial (a) antes e (b) após a execução do revestimento.....	60
Figura 21 - Colagem das pastilhas para execução do ensaio de resistência à aderência superficial .....	61
Figura 22 - Formas de ruptura dos corpos de prova .....	62
Figura 23 - Fibra da Carnaúba .....	64
Figura 24 - Curva de análise térmica das fibras na condição natural e tratada.....	67
Figura 25 - Análise de calorimetria diferencial exploratória.....	68
Figura 26 - Espectros de FTIR para fibras de carnaúba na condição natural e tratada .....	69
Figura 27 - Difratograma da fibra de Carnaúba natural e tratada.....	70
Figura 28 - Índice de Consistência das Misturas.....	73
Figura 29 - Ensaio de índice de consistência das misturas analisadas.....	74
Figura 30 - Densidade de massa e Teor de ar incorporado .....	76
Figura 31 - Retenção de água.....	77
Figura 32 - Perfil típico de do ensaio de squeeze-flow realizado com deslocamento controlado.....	78

Figura 33 - Ensaio de Squeeze Flow para taxa de carregamento de 0,1mm/s (a) após 15 min da mistura e (b) após 65min da mistura.....	79
Figura 34 - Squeeze Flow para taxa de carregamento igual a 3,0mm/s (a) após 10 min da mistura e (b) após 60min da mistura .....	81
Figura 35 - Resistência à flexão aos 7 e 28 dias.....	82
Figura 36 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	83
Figura 37 - Aspecto dos corpos de prova com 1,0% de fibra não tratada (a) após a ruptura (b) após separação das partes rompida e (c) perfil da fratura à flexão .....	84
Figura 38 - Módulo de elasticidade dinâmico .....	85
Figura 39 - Aspecto poroso da argamassa .....	86
Figura 40 - Coeficiente de Absorção por capilaridade.....	87
Figura 41 - Absorção por imersão e índice de vazios .....	88
Figura 42 - Variação dimensional das argamassas.....	89
Figura 43 – Painéis revestidos com argamassa (a) referência (b) FNT0,5% (c) FT0,5%.....	89
Figura 44 - Resultados do Ensaio de Aderência ao substrato .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisas sobre aplicações das fibras de carnaúba.....	24
Tabela 2 - Composição química da fibra de carnaúba não tratada .....	27
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da fibra de carnaúba .....	28
Tabela 4 - Caracterização física da areia .....	33
Tabela 5- Proporções das misturas de argamassa no traço 1:3 .....	44
Tabela 6 - Massa específica e unitária dos materiais constituintes .....	44
Tabela 7 - Determinação do consumo dos materiais .....	45
Tabela 8 - Relação dos ensaios de caracterização das argamassas.....	45
Tabela 9 - Propriedades Físicas da Fibra de Carnaúba .....	63
Tabela 10 - Absorção de água pelas fibras de carnaúba .....	65
Tabela 11 - Intensidade dos picos das redes 001 e 002 identificados na DRX.....	71
Tabela 12 - Resistência à tração direta das fibras de carnaúba.....	72
Tabela 13 - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à flexão das misturas aos 7 e 28 dias .....	82
Tabela 14 - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à compressão das misturas aos 7 e 28 dias .....	83
Tabela 15 - Resistência de aderência à tração e formas de ruptura .....	90

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	centímetro
DRX	Difraco de Raios-X
DSC	Calorimetria diferencial Exploratora
Fa/c	Fator de água cimento
FNT	Fibra não tratada
FT	Fibra tratada
FTIR	Espectroscopia com Transformada de Fourier
g	grama
GPa	gigapascal
IC	ndice de Cristalinidade
kg	quilograma
MEV	Microscopia Eletrnica de Varredura
mm	milímetro
MPa	megapascal
N	newton
NBR	Norma Brasileira
PHB	Polihidroxibutirato
REF	Referência
RPM	Rotao es por minuto
TGA	Termogravimetria

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
	2.1 Objetivo Geral.....	15
	2.2 Objetivos Específicos.....	15
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
	3.1 Fibras.....	16
	3.1.1 Fibras sintéticas e Fibras Naturais.....	16
	3.1.2 Fibras Vegetais.....	17
	3.2 Compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras vegetais.....	20
	3.4 Fibra de Carnaúba ( <i>Copernícia Prunifera</i> ).....	23
	3.4.1 Pesquisas de aplicação da fibra de carnaúba.....	24
	3.4.2 Propriedades da fibra de carnaúba.....	27
	3.4.3 Tratamento da fibra de carnaúba.....	29
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	32
	4.1 Materiais.....	32
	4.1.1 Fibra da Carnaúba.....	32
	4.1.2 Cimento Portland.....	32
	4.1.3 Areia.....	32
	4.2 Métodos.....	33
	4.2.1 Tratamento das fibras.....	34
	4.2.2 Caracterização da Fibra.....	36
	4.2.2.1 Caracterização física da fibra.....	36
	4.2.2.2 Análise Térmica.....	38
	4.2.2.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	39
	4.2.2.4 Difração de raios-X.....	40
	4.2.2.5 Caracterização Mecânica.....	40
	4.2.3 Dosagem e produção das argamassas.....	42
	4.2.4 Caracterização das Argamassas.....	45
	4.2.4.1 Ensaio no Estado Fresco.....	46
	4.2.4.1.1 Índice de Consistência.....	47
	4.2.4.1.2 Ensaio de retenção de água.....	47
	4.2.4.1.3 Ensaio de densidade de massa e teor de ar-incorporado.....	49

4.2.4.1.4	Ensaio de Squeeze Flow .....	49
4.2.4.2	Ensaio no estado endurecido .....	51
4.2.4.2.1	Resistência à tração na flexão e compressão axial .....	51
4.2.4.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico .....	53
4.2.4.2.3	Ensaio de Absorção de água por capilaridade, Absorção por imersão e índice de vazios .....	55
4.2.4.2.4	Ensaio de Variação Dimensional (retração ou expansão linear).....	58
4.2.4.2.5	Resistência de aderência à tração.....	59
4.2.4.3	Análise Estatística.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
5.1	Caracterização das Fibras .....	63
5.1.1	Caracterização física da fibra .....	63
5.1.2	Análise Térmica.....	65
5.1.3	Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	69
5.1.4	Difração de raios-X.....	70
5.1.5	Caracterização Mecânica .....	71
5.2	Caracterização das argamassas.....	72
5.2.2	Ensaio no Estado Fresco.....	72
5.2.2.1	Índice de Consistência.....	73
5.2.2.2	Densidade de massa e teor de ar-incorporado.....	75
5.2.2.3	Retenção de água .....	76
5.2.2.4	Squeeze Flow.....	77
5.2.3	Ensaio no Estado Endurecido.....	81
5.2.3.1	Resistência à tração na flexão e compressão axial .....	81
5.2.3.2	Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	85
5.2.3.3	Absorção por Capilaridade, absorção por Imersão e índice de vazios .....	86
5.2.3.4	Variação Dimensional (retração ou expansão linear) .....	88
5.2.3.5	Resistência de aderência à tração.....	89
6	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93

## 1 INTRODUÇÃO

O descarte de resíduos agrícolas oriundos da atividade agroindustrial e da exploração econômica de materiais disponíveis espontaneamente na natureza é um problema ambiental enfrentado por vários países (Ali *et. al*, 2022), o aproveitamento desses resíduos incorporando-os a produtos é uma abordagem para superar os impactos ambientais (Ahmad e Zhou, 2022), uma ação sustentável que pode contribuir para a redução do impacto ambiental causado pelos processos produtivos ao promover a utilização de recursos renováveis (Da Silveira, 2024).

A substituição de materiais produzidos artificialmente por fibras naturais lignocelulósicas é uma abordagem que tem sido usada para superar as questões ambientais relacionadas ao descarte de resíduos e ao uso de matérias-primas não renováveis (Ahmad e Zhou, 2022), por serem encontradas localmente a um custo relativamente baixo em comparação com as matérias-primas tradicionais (Wani e Ganesh, 2022; Alshaya, 2018). Entre as vantagens para a adoção desses materiais cita-se o baixo consumo de energia utilizado para seu aproveitamento, a disponibilidade local e propriedades, como baixa densidade, alta biodegradabilidade, não toxicidade, baixa condutividade térmica e acústica (Da Silveira *et. al*, 2024; Fernandes *et. al*, 2011).

No campo da construção civil, uma das abordagens é a incorporação desses resíduos aos materiais cimentícios na forma de fibras como potenciais substitutos para fibras artificiais, conforme destacam Ahmad e Zhou (2022) e Alshaya (2018).

A literatura reporta vasta quantidade de estudos sobre as propriedades de materiais cimentícios reforçados com diferentes tipos de fibras naturais, como as fibras de coco (Awoyera, *et. al*, 2022; Thanushan e Sathiparan, 2022), de sisal (Priyadharshini e Ramakrishna, 2018), de banana (Thanushan e Sathiparan, 2022), de Cana-de-açúcar (De Pellegrin, Acordi e Montedo, 2019), de curauá (De Azevedo *et. al*, 2020), de açaí (De Azevedo *et. al*, 2021), de guarumã (Azevedo *et. al*, 2022; Santo de Lima *et. al*, 2024), de palha do milho (De Aquino *et. al*, 2020). Em comum, essas pesquisas mostram a possibilidade do uso de fibras como reforço em materiais cimentícios como as argamassas, contribuindo para melhorar suas propriedades, no entanto, ressaltam que a aplicação das fibras para este fim encontra limitações associadas à heterogeneidade, alta hidrofiliabilidade e instabilidade da fibra quando submetida ao ambiente alcalino gerado pela matriz cimentícia,

propriedades que podem comprometer durabilidade e desempenho dos compósitos produzidos.

Neste sentido, Ali *et. al* (2022) e Khan, Reehman e Ali (2020) corroboram com a importância de estudos sobre os tipos de fibras disponíveis na natureza e o desenvolvimento de tratamentos visando incorporá-los à esses materiais

A Carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma palmeira nativa da região Nordeste do Brasil, conhecida pela resistência às condições climáticas do semiárido e por ser um importante recurso econômico para agricultores extrativistas no período de seca (Da Silva *et. al*, 2018). Seu produto de maior valor comercial é a cera retirada de suas folhas, conhecida internacionalmente como “cera de carnaúba” (Da Silva *et. al*, 2018), obtida após um processo de beneficiamento do material. Após a retirada da cera, ocorre a geração da palha, material fibroso proveniente da folha, tradicionalmente utilizado para a confecção de produtos artesanais como vassouras, escovas, cestos, cobertura de casas ou ainda descartado na natureza, tornando-se um problema ambiental (PNUD, 2012).

Diversos estudos têm se dedicado a investigar as diversas aplicações das fibras de carnaúba, como a produção de biocombustível (Lima *et. al*, 2019; Da Silva *et. al*, 2018; Bezerra *et. al*, 2024), de fertilizantes (Da Silva *et. al*, 2022) e como material de reforço de compósitos de matriz polimérica (Melo *et. al*, 2012, Junior *et. al*, 2020). No entanto, a aplicação das fibras de carnaúba em materiais de construção civil, especialmente em compostos à base de cimento, ainda é pouco explorada.

Portanto, este trabalho visa contribuir para o avanço dos estudos relacionados à aplicação de fibras naturais em materiais cimentícios aliada ao aproveitamento de resíduos oriundos da atividade agroindustrial através da avaliação do potencial de uso da fibra da carnaúba em argamassas de revestimento a base de cimento para construção civil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o efeito da adição de fibras de carnaúba como material de reforço de argamassas de revestimento a base de cimento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

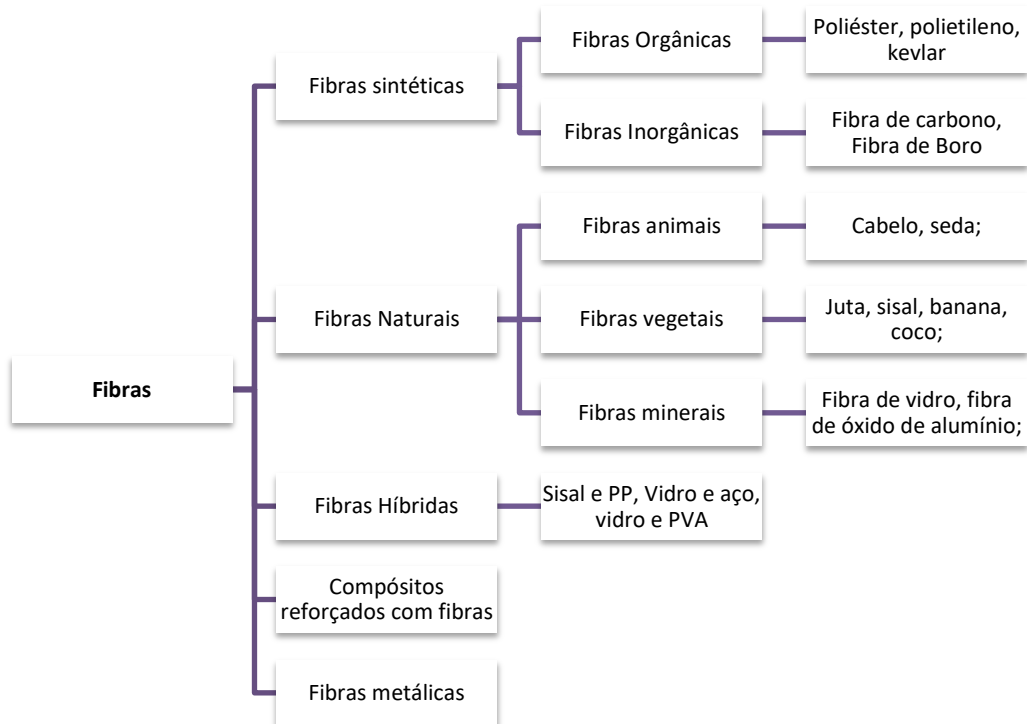
- i. Analisar a influência da realização do tratamento alcalino com solução de  $\text{CaOH}_2$  nas propriedades físicas, mecânicas, químicas e estruturais da fibra de carnaúba;
- ii. Analisar a influência da aplicação do tratamento alcalino no comportamento térmico das fibras de carnaúba;
- iii. Analisar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido das argamassas reforçadas com fibras de carnaúba nas condições natural e submetidas ao tratamento alcalino.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Fibras

As fibras são classificadas de acordo com a origem do seu material constituinte em dois grandes grupos: fibras naturais e sintéticas (Wani e Ganesh, 2022; Ahmad e Zhou, 2022), esses materiais ainda podem ser utilizados de forma combinada (Cao e Zhang, 2018), a Figura 1 apresenta um esquema com as principais formas de classificação das fibras.

**Figura 1 - Classificação das Fibras**



**Fonte:** Adaptado de Wani e Ganesh (2022)

##### 3.1.1 Fibras sintéticas e Fibras Naturais

Conforme explicam Wani e Ganesh (2022), as fibras sintéticas são de origem artificial e podem ser classificadas como orgânicas ou inorgânicas.

Uma ampla variedade de materiais sintéticos é utilizada como matéria prima na produção de fibras, ZHAO *et. al* (2023) destacam que materiais sintéticos mais

utilizados na produção das fibras são o aço, basalto, vidro, carbono, polipropileno, álcool polivinílico, poliácridonitrila, polietileno, nylon, de acordo com os autores, na avaliação as propriedades das fibras para utilização como material de reforço em compósitos são: densidade relativa, resistência à tração, módulo de elasticidade, diâmetro, alongamento final, temperatura de operação.

Para os materiais cimentícios, conforme destacam Ali *et. al* (2022), as fibras mais utilizadas são as de aço, usadas por suas propriedades de alta resistência à tração, resistência à flexão e conseguir melhora na tenacidade do compósito cimentício; e as fibras de polipropileno, que contribuem para melhorar a durabilidade e tenacidade do material.

As fibras naturais é uma nova categoria de materiais de engenharia de origem natural (Wani e Ganesh, 2022) e podem ser classificadas quanto à matéria-prima que as constituem como: fibra animal, mineral ou vegetal (Ahmad e Zhou, 2022).

Comparando os dois materiais, Ali *et. al* (2022) destacam que as fibras sintéticas convencionais são mais caras, especialmente quando necessitam ser importadas de outros países, corroborando, Vivek e Prabalini (2021) explicam que as fibras naturais apresentam como vantagens o custo inferior e a possibilidade de serem obtidas localmente, além de serem renováveis, reutilizáveis e biodegradáveis.

### **3.1.2 Fibras Vegetais**

A ampla diversidade de fibras vegetais disponíveis em várias partes do mundo tem contribuído para o avanço das pesquisas visando o aproveitamento como material de engenharia, podem ser aplicadas como material de reforço em compósitos de matrizes cerâmicas (Thanushan e Sathiparan, 2022), biocompósitos (Melo *et. al*, 2012), polímeros (Junior *et. al*, 2020) e compósitos cimentícios (Alshaya *et. al*, 2018).

De acordo com Vivek e Prabalini (2021) as fibras vegetais mais utilizadas para aplicações em materiais compósitos são fibra de juta, algodão, coco, linho, sisal e bananeira.

Segundo Alshaya *et. al* (2018) um dos fatores que afetam as propriedades das fibras é a parte da planta da qual são extraídas, podendo ser categorizadas

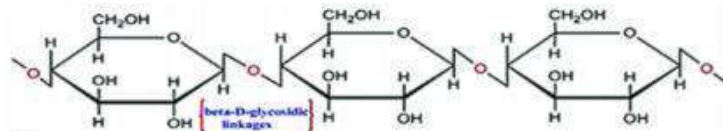
quanto a esse aspecto como caule (milho, cana-de-açúcar); folha (abacaxi e sisal); semente (coco e algodão), grama e fibra da madeira.

Os principais constituintes das fibras vegetais são a celulose, hemicelulose e a lignina, são macromoléculas arranjadas entre si presentes na parede celular das plantas (Fornari 2017).

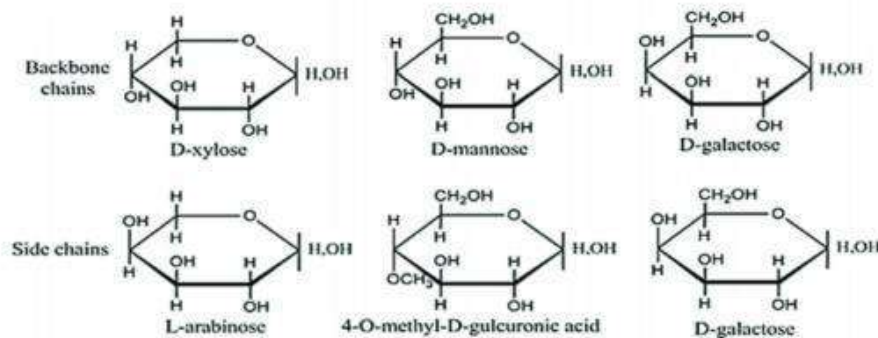
A Figura 2 descreve a estrutura química dos principais componentes encontrados nas fibras vegetais.

**Figura 2 -** Estrutura química dos principais constituintes das fibras vegetais

**(a) Cellulose**



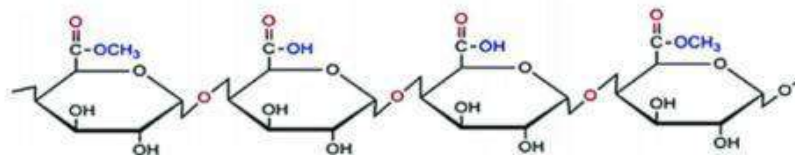
**(b) Hemicellulose**



**(c) Phenols in Lignin**



**(d) Pectin**



Fonte: Adaptado de Ahmad e Zhou (2022)

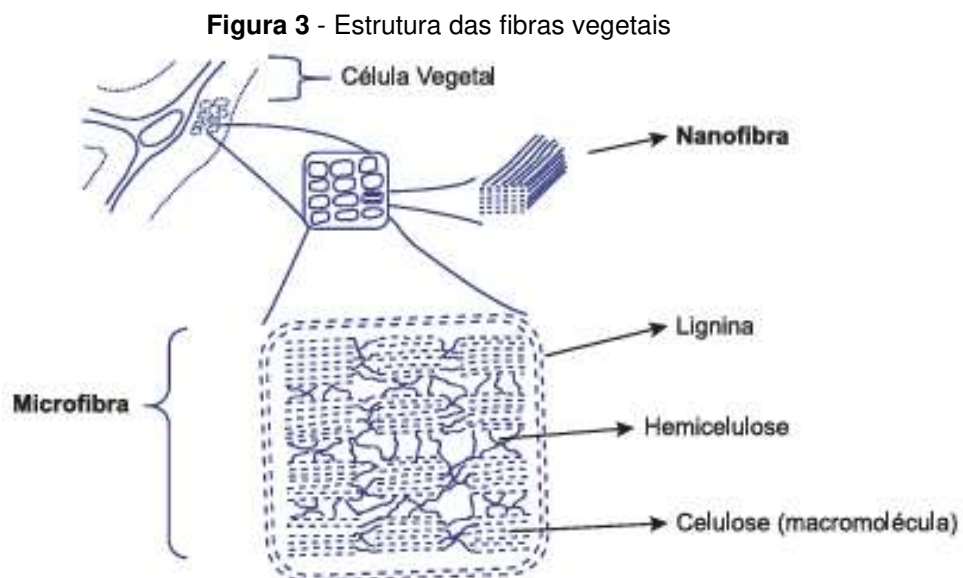
A celulose é um polímero natural de cadeia longa, definido quimicamente como a união de monômeros de glicose unidos por ligações  $\beta$  1,4 glicosídicas (Fornari, 2017), encontrada na forma cristalina e na forma amorfa, com locais de alta e baixa ordem, é resistente a álcalis fortes e agentes oxidantes e redutores, segundo Ahmad e Zhou (2022), é vulnerável à hidrólise com ácido para produzir açúcares

solúveis em água e biodegradáveis quando submetida a tratamento químico e em solução.

Diferente da celulose que apresenta unidade repetitiva de glicose, segundo Fornari (2017) a hemicelulose é um polímero altamente ramificado de caráter amorfo, constituído por diferentes tipos de sacarídeos, capaz de formar ligações de hidrogênio com a celulose, ligações covalentes com a lignina e ligações éster com unidades acetil e ácido hidroxi-cinâmico.

A estrutura da lignina, conforme descrito por Fornari (2017) é caracterizada como uma macromolécula polifenólica amorfa e altamente ramificada, arranjada tridimensionalmente em três principais unidades: p-hidroxifenila, siringila e guaiacila, que podem ser ligadas à cadeia alifática de três carbonos formando as unidades p-hidroxifenil propano, sirigilpropano e guaicilpropano.

Quanto ao arranjo dos constituintes na fibra, segundo Da Silveira et. al (2024) a celulose está presente nas fibras vegetais na forma de fibrilas incorporadas a uma matriz amorfa da hemicelulose, responsável por promover a ligação das fibrilas e de lignina, que protege o conjunto. Segundo Fornari (2017) as macromoléculas de celulose formam ligações entre si formando nanofibras, a hemicelulose atua na ligação entre essas unidades dando origem às microfibras, uma estrutura maior e macroscopicamente mais volumosa, a lignina atua envolvendo o conjunto, a soma destas estruturas forma as fibras vegetais propriamente ditas, o esquema de formação das fibras vegetais está mostrado na Figura 3.



Fonte: Fornari (2017)

Quanto ao papel desempenhado por esses componentes nas propriedades da fibra, Da Silveira *et. al* (2024), indicam que o maior teor de celulose está associado ao acréscimo da resistência à tração e módulo de elasticidade, o ângulo de microfibrila determina a rigidez, enquanto o aumento nos teores de lignina e hemicelulose contribuem para o aumento da absorção de água.

### **3.2 Compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras vegetais**

Materiais cimentícios, como argamassas e concretos, apresentam problemas relacionados à baixa resistência à tração, baixa tenacidade e retração, que ocorre após perda de água interna, evaporação ou consumo decorrente das reações de hidratação do cimento Portland (Ahmad e Zhou, 2022)

Uma das alternativas utilizadas para melhorar essas propriedades é a adição de fibras, incorporadas com o objetivo de melhorar a ductilidade, tenacidade e flexibilidade (Thanushan e Sathiparan, 2022) e as propriedades mecânicas de resistência à tração e flexão (Surnam e Imrith, 2023; Mathavan, Sakthieswaran e Babu, 2021), as fibras contribuem para melhorar essas propriedades pois são capazes de transpor a trinca de maneira mais apropriada que a matriz simples, conforme DE OLIVEIRA LIBÓRIO DOURADO *et al* (2023) explicam, as fibras atuam como pontes nas fissuras e induzindo a transferência de cargas tanto em fissuras de compressão quanto em ensaios de tração indireta. .

No estudo da adição de fibras aos compósitos cimentícios um aspecto importante é a análise da influência das propriedades das misturas no estado fresco, conforme destaca Da Silva *et. al* (2023) a análise de parâmetros reológicos e de hidratação é um indicador relevante para identificar alterações nas propriedades e no desempenho mecânico no estado fresco de materiais cimentícios, uma vez que tais parâmetros interferem fortemente na interação fibra-matriz.

Priyadharshini e Ramakrishna (2018) destacam que não há ensaios unificados que permitam conhecer o comportamento das argamassas em seu estado fresco.

Quanto a esse aspecto, verifica-se que a adição de fibras atua reduzindo a fluidez e trabalhabilidade da argamassa, conforme observado nos estudos sobre diferentes tipos de fibra, como as fibras de açaí (Azevedo *et. al*, 2021), fibras de sisal (Priyadharshini e Ramakrishna, 2018) e fibras de coco (Awoyera, Paul O. *et al*,

2022), segundo os autores isso ocorreu porque a adição das fibras contribuiu para melhorar a estabilidade da mistura.

Quanto às propriedades mecânicas, conforme Ali *et. al* (2022) a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras são geralmente superiores aos da matriz simples, a adição de fibras é capaz de melhorar substancialmente a resistência à tração dos compósitos cimentícios, contribui para o aumento da tenacidade de compósitos cimentícios tanto à compressão quanto à tração.

### **3.2.1 Durabilidade dos compósitos reforçados com fibra vegetais**

Um dos obstáculos para o uso de fibras vegetais com material de reforço em compósitos de matriz cimentícia se deve à incompatibilidade química dos dois materiais, neles a ligação química entre a fibra e a matriz ocorre principalmente devido à força de Van der Waals e interações dos grupos hidroxila da celulose e hidróxido de cálcio presente na matriz (Ferreira *et. al*, 2015).

Nesse contexto, Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria (2023), citam duas possíveis estratégias, a alteração da composição da matriz visando reduzir a alcalinidade ou modificação prévia da fibra natural através de processos químicos ou físicos com o objetivo de melhorar a sua estabilidade.

A alta hidrofiliabilidade das fibras também contribui para o enfraquecimento da adesão da fibra com matriz, o processo de interação ocorre como descrito por Ali *et. al* (2022) no estudo sobre compósitos cimentícios reforçados com fibra de coco, segundo os autores, devido à natureza hidrofílica, ainda no estado fresco, os filamentos absorvem água da mistura, após a secagem, a fibra perde umidade para o meio e encolhe, deixando um espaço vazio entre a pasta de cimento e o filamento, o que pode aumentar a porosidade permeável afetando negativamente a durabilidade, a perda na força de adesão também pode diminuir a eficiência da fibra, contribuindo para redução da ductilidade e tenacidade do compósito.

### **3.3 Tratamentos nas fibras vegetais para aplicação em materiais cimentícios**

A degradação da fibra natural devido ao caráter alcalino da solução na matriz de cimento diminui a durabilidade (Ferreira *et. al*, 2011), isso pode causar falha prematura do compósito, uma das soluções para o problema consiste na aplicação

métodos de pré-tratamentos que alteram a fibra visando melhorar a compatibilidade com a matriz cimentícia.

Os métodos de tratamento aplicados às fibras vegetais atuam modificando a estrutura física e a composição química, principalmente alterando as cadeias de celulose, removendo lignina ou hemicelulose, ou induzindo ambas as alterações simultaneamente (Da Silva *et. al*, 2018), conforme apresentado nas subseções seguintes.

### **3.3.1.1 Hornificação**

Trata-se de um tipo de tratamento baseado no enrijecimento da estrutura polimérica presente nos materiais lignocelulósicos. Segundo Ferreira *et. al* (2015), consiste na aplicação de ciclos de molhagem e secagem da fibra com o objetivo de reduzir a hidrofiliabilidade, de acordo com os autores a modificação da microestrutura promovida resulta na estabilidade dimensional da fibra.

### **3.3.1.2 Mercerização**

Segundo, Rahman e Khan (2007) a mercerização trata-se de um método de tratamento alcalino de fibras celulósicas, é utilizado na produção de fibras de alta qualidade que contribui para o aumento da adesão fibra-matriz através da remoção de impurezas da superfície das fibras e da alteração da estrutura cristalina da celulose, conforme observado por Fernandes *et. al* (2011).

Segundo Kim e Netravali (2010) o tratamento por mercerização atua na remoção da hemicelulose e da lignina nas fibras vegetais aumentando o teor de celulose e da cristalinidade do material, contribuindo para o acréscimo nas propriedades de resistência à tração da fibra.

No estudo De Azevedo *et. al* (2020) sobre a aplicação de fibras de curauá em argamassas para revestimento, os autores verificaram que o tratamento alcalino aplicado às fibras de curauá alterou propriedades promovendo o aumento da densidade específica, redução da hidrofiliabilidade e aumento da resistência a tração e do módulo de elasticidade da fibra, que contribuíram para a sua aplicação em compósitos cimentícios.

### 3.3.1.3 Impregnação com Sílica Ativa

As partículas de sílica ativa atuam como enchimentos dentro da matriz cimentícia, reduzem a porosidade do compósito preenchendo vazios e promovendo a adesão da fibra à matriz (Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria, 2023)

## 3.4 Fibra de Carnaúba (*Copernicia Prunifera*)

A carnaúba é uma palmeira xerófita da família das *Palmae*, o nome científico da espécie originária do Brasil é *Copernicia prunifera* existente em abundância na região Nordeste (De Almeilda *et. al*, 2021), seus produtos florestais não madeireiros se inserem como cera e fibras (Guimarães *et. al*, 2018).

Segundo Queiroga *et. al* (2017) a palmeira carnaúba é bastante resistente e se adapta muito bem às condições de seca e enchente severas, a árvore possui folhas verdes opacas, encontradas na copa da planta, dispostas em espiral ao redor do caule.

Devido aos muitos usos e valor para a população local, a carnaúba é popularmente conhecida como a “Árvore da Vida”, com relação ao aproveitamento dos seus componentes, a PNUD (2012) destaca que seu fruto é comestível, a madeira amplamente utilizada na construção e o pó produzido por suas folhas para se proteger da desidratação é aproveitado por diversos setores industriais na produção de uma cera que está entre as mais raras que ocorrem naturalmente no mundo, constituindo seu principal produto, sua produção ocorre principalmente entre os meses de julho e dezembro (De Almeilda *et. al*, 2021)

A cera da carnaúba caracteriza-se por ser dura e quebradiça, com temperatura de fusão entre 80 e 87° (Guimarães *et. al*, 2018), entre os produtos extraídos da árvore é o de principal valor econômico. Segundo Da Silveira *et. al* (2024) a cera é utilizada em aplicações como a fabricação de lubrificantes e agentes anticorrosivos, Junio *et. al* (2020) destacam que as propriedades hipoalergênicas e emolientes da cera de carnaúba justificam seu uso em cosméticos e até mesmo em coberturas de doces.

O processo de extração da cera ocorre conforme descrito por Guimarães *et. al* (2018), após a coleta, as folhas da carnaúba são secas e batidas para o

desprendimento do pó, que é cozido, coado e resfriado para obtenção da cera bruta, o beneficiamento proporciona seu aproveitamento industrial, após a retirada do pó as folhas são desfibriladas para aproveitamento da palha na forma de fibras.

Após remoção das folhas para a retirada da cera, os talos ricos em celulose são considerados resíduos e geralmente descartados no solo ou queimados (Junio *et. al*, 2020), quanto ao total de resíduo gerado, Lima *et. al* (2019), estimam que são necessárias 1000 folhas para produzir 7,8 kg de pó de cera, que considerando a demanda pela cera, resultam em aproximadamente 352.210 toneladas por ano de resíduo lignocelulósico, essas informações reforçam a necessidade do desenvolvimento de pesquisas sobre o aproveitamento adequado da palha da carnaúba.

### 3.4.1 Pesquisas de aplicação da fibra de carnaúba

A literatura reporta estudos dedicados ao desenvolvimento de aplicações visando o aproveitamento das fibras carnaúba conforme detalhado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Pesquisas sobre aplicações das fibras de carnaúba**

Nº	ESTUDO	RESUMO DO ESTUDO
01	Melo <i>et. al</i> (2012)	Fibras obtidas das folhas da carnaúba foram modificadas quimicamente visando avaliar seu potencial para o desenvolvimento de um compósito biodegradável a base de PHB. As fibras foram caracterizadas sob os aspectos físicos e mecânicos e submetidas três tipos de pré-tratamentos com objetivo de identificar o mais eficiente na promoção de uma melhor adesão com a matriz. Para o teor de 10% de fibras incorporadas ao polímero, os resultados mostraram a eficiência do pré-tratamento alcalino aplicado e a viabilidade no uso das fibras de carnaúba, por possibilitar uma redução nos custos preservando propriedades mecânicas similares ao polímero puro.
02	Da Silva <i>et. al</i> (2018)	Investigaram o potencial uso da fibra de carnaúba para produção de bioetanol por processo de sacarificação e fermentação simultânea após a aplicação de diferentes tratamentos, os resultados do estudo mostraram que a fibra da carnaúba apresenta um alto teor de celulose comprovando a viabilidade da sua utilização para a aplicação proposta.

- 
- 03** Da Silva *et. al* (2018) Estudo do efeito do pré-tratamento aplicado no resíduo da palha de carnaúba e o uso da palha tratada para a produção de enzimas lignocelulósicas no estado de fermentação sólida. Foram desenvolvidos os tratamentos hidrotérmico, alcalino, ácido-alcalino e alcalino com peróxido de hidrogênio e caracterização dos produtos através de análise composicional, identificação dos grupos funcionais presente por FTIR, determinação índice de cristalinidade da fibra por DRX e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados dos ensaios permitiram verificar o efeito dos tratamentos realizados na capacidade de produção de enzimas pelas fibras, o pré-tratamento alterou as características físicas e químicas da fibra, sendo o tratamento com peróxido de hidrogênio o mais eficiente na remoção da lignina e da hemicelulose, revelando-se um processo promissor para a produção de enzimas lignocelulósicas a partir das fibras de carnaúba.
- 04** Lima *et. al* (2019) Caracterização da palha e do talo *in natura* da fibra de carnaúba e pós-densificação através da fabricação de briquetes visando investigar a possível aplicação como matéria prima na produção de biocombustíveis. Foi realizada a análise elementar, análise imediata para determinação do teor de umidade, voláteis e carbono fixo e determinação do teor de cinzas, foi determinado o poder calorífico, densidade aparente e densidade a granel, ensaio de compressão diametral e resistência ao impacto e análise termogravimétrica dos briquetes. Os resultados indicaram a viabilidade do uso dos materiais para produção de biocombustíveis.
- 06** Junio *et. al* (2020) Desenvolvimento de compósito de matriz polimérica a base de epóxi reforçado com 40% em volume da fibra da carnaúba. Investigou a influência do teor de fibras adicionadas nas propriedades de resistência à tração, resistência ao impacto pelo método de Izod e resistência interfacial da matriz/fibra através de testes de arrancamento. Os resultados indicaram que os compósitos de epóxi reforçados com fibra de carnaúba mostraram melhor resistência à tração que o material constituído de epóxi puro, caracterizando o efeito do reforço, também houve tendência no aumento do módulo de elasticidade devido à alta tenacidade da fibra de carnaúba. De acordo com os resultados de desempenho térmico e mecânico dos compósitos produzidos os autores consideraram viável a utilização da fibra de carnaúba como reforço
-

---

		para matrizes epoxídicas em substituição à fibra de vidro comumente usada.
07	Da Silva (2022)	Produção de complexos enzimáticos de celulases e xylanases utilizando resíduo de carnaúba como fonte de carbono. A biomassa foi analisada quimicamente para determinação dos teores de seus componentes através do protocolo NREL, a análise morfológica foi feita por MEV, a cristalinidade do material foi avaliada por DRX, com os resultados da análise química foram determinadas a porcentagem de remoção de cada componente após o tratamento. Os resultados demonstraram o potencial de reaproveitamento das fibras oriundas do resíduo da carnaúba para produção da celulase e xilanase, a fim de melhorar a produção enzimática, bem como permitir redução de custos e impactos ambientais em seu processo.
08	Pereira, <i>et. al</i> (2021)	Análise da valorização da palha de carnaúba e folha de cajueiro para utilização como bioadsorventes para remoção de íons cobre (II) de solução aquosa. Os resultados indicaram que a palha da carnaúba tem potencial promissor para serem usados como bioadsorventes de íons cobre (II) na recuperação de águas residuais.
09	Eduardo, Nóbrega e Ferreira (2021)	Análise do comportamento de argamassas com adição de fibras da palha de carnaúba no estado fresco e endurecido. Foram produzidas argamassas de cimento e areia na proporção de 1:3 com adição de 3% e 5% de fibra da palha da carnaúba (FPC) em relação à massa do cimento, utilizando relação água/cimento de 0,72. Também foi avaliado o comportamento das argamassas variando o comprimento fibra de 20, 40 e 60mm. Os resultados indicaram que a adição das fibras resulta em argamassas com menor consistência e menor resistência mecânicas á compressão. A análise dos resultados foi feita por comparação direta e o melhor desempenho foi obtido para adições de até 3% utilizando fibras de 20mm.

---

A análise da literatura sobre as aplicações da fibra de carnaúba evidencia que ainda não existem estudos aprofundados sobre a utilização de fibras de carnaúba como material de reforço de compósitos de matriz cimentícia, representando uma lacuna de pesquisas sobre esse tipo de material.

### 3.4.2 Propriedades da fibra de carnaúba.

Um dos primeiros estudos relacionados às propriedades da fibra de Carnaúba foi desenvolvido por Fernandes *et. al* (2011), os autores estudaram a influência dos tratamentos químicos nas propriedades mecânicas, térmicas e de absorção da fibra.

A Tabela 2 apresenta a composição química da fibra de carnaúba não tratada obtida nos estudos de Junio *et. al* (2022) e Melo *et. al* (2012) e Da Silva *et. al* (2018), não foi possível identificar nos trabalhos analisados aspectos relacionados à preparação das amostra o que dificulta a comparação e análise da variação verificada para os resultados apresentados.

**Tabela 2** - Composição química da fibra de carnaúba não tratada

<b>Componente</b>	<b>Melo <i>et. al</i> (2012)</b>	<b>Da Silva <i>et. al</i> (2018)</b>	<b>Junio <i>et. al</i> (2022)</b>
Cera	-	11,62%	4,8%
Cinzas	1,80%	7,69%	2,2%
Lignina	19,03%	32,79	36,9%
Hemicelulose	14,02%	11,84%	40,9%
Celulose	58,04%	23,96%	20,2%
Umidade	7,53%	-	7,2%
Outros	-	12,10%	-

As fibras de Carnaúba foram caracterizadas sob aspectos estruturais, térmicos e mecânicos por Junio *et. al* (2022), segundo os autores, a existência de poucos estudos relacionados é um fator limitante para o aumento de sua empregabilidade em aplicações de engenharia e consideram a quantificação de constituintes químicos apresentada por fibras de carnaúba necessária para a determinação de suas propriedades.

A análise da morfologia da fibra desenvolvida no estudo de Junio *et. al* (2022) identificou uma seção de fibra de formato elíptico. Os autores correlacionaram a redução da densidade ao aumento do diâmetro das fibras analisadas, explicada pelos vazios observados no interior da fibra, canais responsáveis pela transferência de nutrientes ao longo da estrutura do seu eixo longitudinal, observados nas micrografias de seção transversal das fibras obtidas através dos ensaios de MEV, as análises também revelaram a presença de diversos defeitos superficiais nas fibras, como porosidade, trincas e degradação de fibras.

A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados na literatura para as propriedades da fibra de carnaúba nas condições tratada (FT) e não tratada (FNT).

**Tabela 3 - Propriedades mecânicas da fibra de carnaúba**

Propriedades	Melo <i>et. al</i> (2012)		Junio <i>et. al</i> (2023)
	FNT	FT	FNT
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,34	1,44	1,13
Diâmetro	-	-	
Resistência à tração (MPa)	205-264	148-248	64,7
Módulo de elasticidade (GPa)	8,2-9,2	6,3-14,0	1,37
Alongamento máximo (%)	1,7-2,6%	1,7-2,6%	5,59

As propriedades físicas, mecânicas e morfológicas foram estudadas por Junio *et. al* (2023), os autores observaram a similaridade com outras fibras naturais lignocelulósicas tradicionalmente utilizadas como o bambu, sisal, piaçava e curau, indicando a possibilidade de utilização destes materiais em aplicações de reforço de materiais compósitos.

Quanto às propriedades mecânicas os resultados da pesquisa de Melo *et. al* (2012) indicaram alongamento total da fibra entre 1,7 e 2,6%, resistência à tração de 205 a 264MPa e módulo de elasticidade de 8,2 e 9,2 GPa, baseado nesses dados, Junio *et. al* (2020) verificaram que os resultados das propriedades mecânicas das fibras de carnaúba se equiparam a outras fibras naturais lignocelulósicas como o coco, bambu e piaçava.

Comparando as fibras de carnaúba a outros materiais de base lignocelulósica, Fernandes *et. al* (2011) observaram que os resultados referentes às suas propriedades mecânicas se assemelham aos resultados obtidos para algodão e sisal em termos de módulo de elasticidade e ao sisal e linho em termos de resistência à tração.

No estudo das propriedades térmicas elaborado por Junio *et. al* (2022), a análise termogravimétrica das fibras de carnaúba indicaram perda de massa significativa em dois patamares, o primeiro em 64°C atribuída à perda da umidade e o segundo ocorrendo em 207°C e 414°C, relacionado a eventos de degradação de constituintes lignocelulósicos presentes na estrutura da fibra.

Em outro estudo, Junio *et. al* (2020) identificaram que a perda de massa total aos 200°C foi 9,63%, verificaram também que temperaturas inicial e final de degradação da fibra de carnaúba em 267° e 326°C, e perda de massa de 63,1% ao término do segundo estágio.

A análise termogravimétrica desenvolvida por Melo *et. al* (2012), mostrou uma perda de massa entre 30 e 130°C atribuída à perda de umidade e vaporização de resíduos sólidos nas fibras, acima dessa temperatura a fibra perde estabilidade térmica, a degradação térmica ocorre inicialmente no estágio de 240-280°C, associada à despolimerização da hemicelulose e destruição de regiões cristalinas, onde a perda de massa é cerca de 50%, no estágio entre 380 e 530°C ocorre à decomposição final.

### **3.4.3 Tratamento da fibra de carnaúba**

Diversos estudos analisaram a influência dos tratamentos nas propriedades da fibra de carnaúba, o efeito do tratamento é avaliado através da comparação dos resultados com os parâmetros da fibra *in natura*.

Um dos primeiros estudos encontrados na literatura sobre a fibra de carnaúba é o material desenvolvido por Fernandes *et. al* (2011), os autores realizaram a caracterização das fibras quanto à estabilidade térmica, hidrofiliabilidade e resistência mecânica, avaliando o efeito da aplicação de diferentes tratamentos nas propriedades da fibra. Os tipos de tratamento utilizados foram o tratamento alcalino com NaOH, com tetracloreto de carbono e ciclohexano, escolhidos tomando como referência outras pesquisas com fibras lignocelulósicas. Para análise do efeito dos tratamentos na morfologia das fibras os autores utilizaram ensaios de MEV e observaram que o tratamento com solventes (hexano e tetracloreto de carbono) produziram as mudanças mais significativas na superfície da fibra quando comparadas ao tratamento alcalino, por atuarem removendo a camada de cera de carnaúba. O estudo também avaliou a alteração na capacidade de absorção de água pela fibra, os resultados indicaram que em comum, os tratamentos não alteraram a quantidade de água total absorvida pela fibra, entretanto, contribuíram para tornar o processo de absorção mais rápido. Quanto às alterações na estrutura química das fibras, foi feita a análise termogravimétrica da fibra para cada tratamento aplicado, os resultados indicaram que o tratamento alcalino alterou a

estrutura cristalina da celulose, enquanto o tratamento com solventes atuaram apenas na remoção da camada de cera da superfície.

No estudo de Melo *et. al* (2012), as fibras obtidas das folhas da carnaúba foram modificadas visando avaliar seu potencial para o desenvolvimento de um compósito biodegradável a base de PHB. A aplicação dos tratamentos propostos para as fibras tinham o objetivo de melhorar a adesão interfacial entre a fibra e a matriz de PHB. Foram analisados os pré-tratamentos alcalino, com peróxido, permanganato de potássio e acetilação. Para análise dos resultados foram realizados ensaios de MEV, as imagens obtidas mostraram que todos os pré-tratamentos aplicados foram eficientes para a remoção da cera depositada na superfície da fibra, os resultados evidenciaram a efetividade do tratamento alcalino, porém indicaram que concentrações maiores de NaOH poderiam ser deletérios por promoverem a degradação superficial da fibra. O tratamento com peróxido contribuiu para a remoção da cera, mantendo a rugosidade da fibra, contribuindo para uma melhor adesão da fibra-matriz e por consequência das propriedades mecânicas dos compósitos. Todos os tratamentos também contribuíram para o acréscimo na densidade da fibra, os autores explicam que eles atuam tornando a estrutura celular mais compacta com a redução dos teores de vazios na fibra. Quanto aos ensaios mecânicos, os resultados mostraram que a resistência à tração das fibras de carnaúba tratadas em geral foi menor do que a das fibras não tratadas. Para fibras tratadas com peróxido, a resistência foi semelhante à das fibras não tratadas. As fibras tratadas com acetilação e permanganato apresentaram as menores resistências. Neste caso, o tratamento pode ter afetado a celulose, que entre os seus componentes, é o principal responsável por conferir resistência mecânica à fibra. A deformação por tensão até a falha das fibras ficou em torno 2% para todos os tratamentos aplicados. O módulo de elasticidade aumentou para o tratamento alcalino e com peróxido

A pesquisa de Da Silva *et. al.* (2018), avaliou a eficiência de três métodos de pré-tratamentos das fibras, aplicados visando verificar de que modo às alterações provocadas eram capazes de contribuir para o processo de hidrólise enzimática para fabricação de etanol. Os tratamentos realizados foram o hidrotérmico, tratamento alcalino e tratamento ácido-alcalino. No tratamento hidrotérmico uma mistura de água e resíduo de carnaúba foi aquecida até 121°C por 30min e então lavada até atingir PH neutro. Para o tratamento alcalino foi preparada uma solução de 4,0% em

massa de NaOH também aquecida a 121°C por 30min e lavada para atingir PH neutro e tratamento ácido-alcalino, inicialmente seguiu o mesmo procedimento do tratamento alcalino, seguido pela submersão das fibras em solução de 2,0% em massa de ácido sulfúrico e depois lavadas até atingir o PH neutro. Os resultados mostraram que os três processos provocaram alterações nas fibras. O tratamento alcalino apresentou maior efeito na remoção da lignina e da hemicelulose, o tratamento ácido-alcalino promoveu uma perda de 50% celulose e o tratamento hidrotérmico não se mostrou eficiente na remoção da lignina, reforçando a eficiência do tratamento alcalino no pré-tratamento de materiais lignocelulósicos e especificamente na palha da carnaúba. Os resultados da análise composicional da fibra após tratamentos indicaram também a presença de resíduos (esteroides, ácidos de gordura, pectina e polissacarídeos gerados após a realização dos tratamentos propostos), assim como fragmentos desses compostos, que por não serem extraídos por solventes orgânicos fracos se precipitaram novamente nas fibras, também foi observado um alto teor de cinzas, comum em resíduos agrícolas.

O estudo de Da Silva *et. al* (2018) avaliou a viabilidade do uso da biomassa resultante do resíduo da palha de carnaúba após a realização de tratamento hidrotérmico, alcalino, ácido-alcalino e alcalino com peróxido de hidrogênio. Na pesquisa, o objetivo dos tratamentos foi aumentar a hidrólise da biomassa visando melhorar a digestibilidade das enzimas lignocelulósicas utilizada na produção do etanol. A eficiência dos tratamentos foi avaliada comparando alteração da composição química do material, os resultados indicaram que o tratamento alcalino foi o mais eficiente na remoção simultânea da lignina e da hemicelulose, o que corrobora com o aumento do índice de cristalinidade do material observado nos ensaios de FTIR e DRX, esses resultados corroboraram com os observados por Da Silva *et. al* (2022) que aplicaram o pré-tratamento com o objetivo de melhorar a eficiência dos processos de deslignificação, foi realizado o tratamento alcalino com peróxido de hidrogênio, os resultados mostraram a eficiência do processo na remoção da lignina e da hemicelulose.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **4.1 Materiais**

#### **4.1.1 Fibra da Carnaúba**

As fibras utilizadas na pesquisa são provenientes do Município de Uruaçu no Rio Grande do Norte, obtidas através de um fornecedor local, que realizou uma preparação prévia através da retirada das folhas e prévia secagem ao sol.

#### **4.1.2 Cimento Portland**

Para produção das argamassas utilizou-se o cimento do tipo CP-IV RS da marca Poty, que consiste em um cimento Portland com adição pozolânica, escolhido por se tratar de um tipo de cimento com menor adição de clínquer na sua produção.

Para os ensaios realizados nessa pesquisa foi determinada a massa específica do cimento igual a  $3,18\text{g/cm}^3$ , conforme NBR 16605 (ABNT, 2017).

#### **4.1.3 Areia**

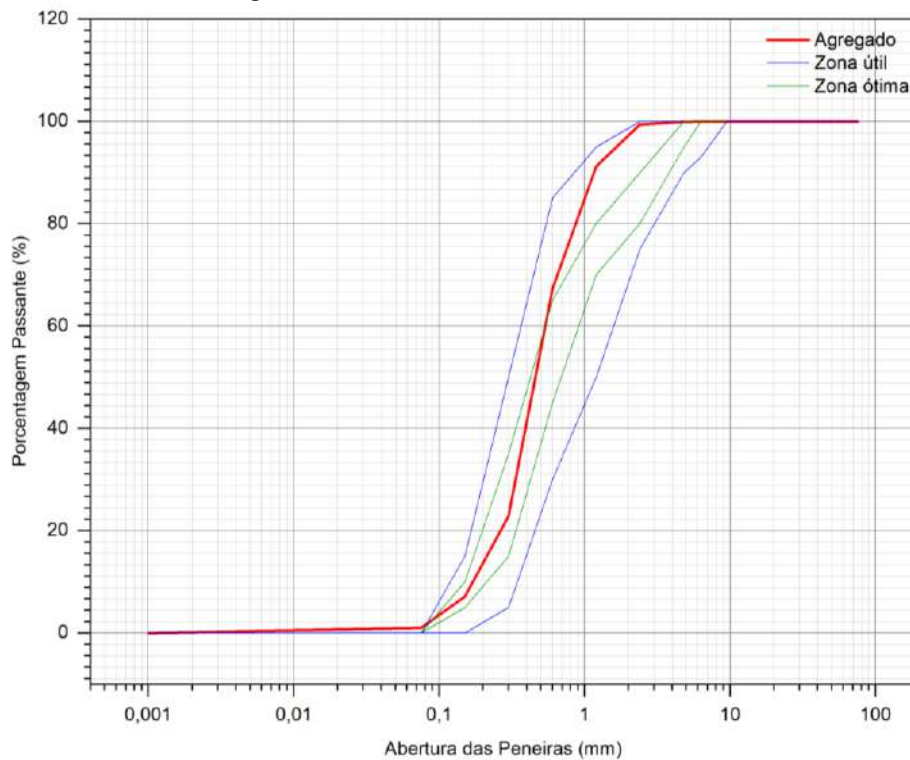
A areia utilizada foi a areia de rio com granulometria fina, peneirada e homogeneizada de acordo com os métodos estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2022).

Para sua caracterização foi realizado o ensaio de granulometria conforme NBR 17054 (ABNT, 2022), que permitiu a obtenção da sua curva granulométrica, do seu módulo de finura e da dimensão máxima do agregado, a massa específica determinada conforme NBR 16916 (ABNT, 2021) e a massa unitária conforme NBR 16972 (ABNT, 2021).

A Figura 4, apresenta a curva obtida a partir do ensaio de granulometria realizado conforme procedimentos determinados na NBR 17054 (ABNT, 2022), os resultados do ensaio permitiram enquadrar a areia utilizada na pesquisa na zona útil

de utilização, a partir dos dados obtidos no ensaio também foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado.

**Figura 4 - Curva Granulométrica da Areia**



A massa específica da areia foi determinada conforme NBR 16916 (ABNT, 2021) e a massa unitária igual determinada conforme NBR 16972 (ABNT, 2021).

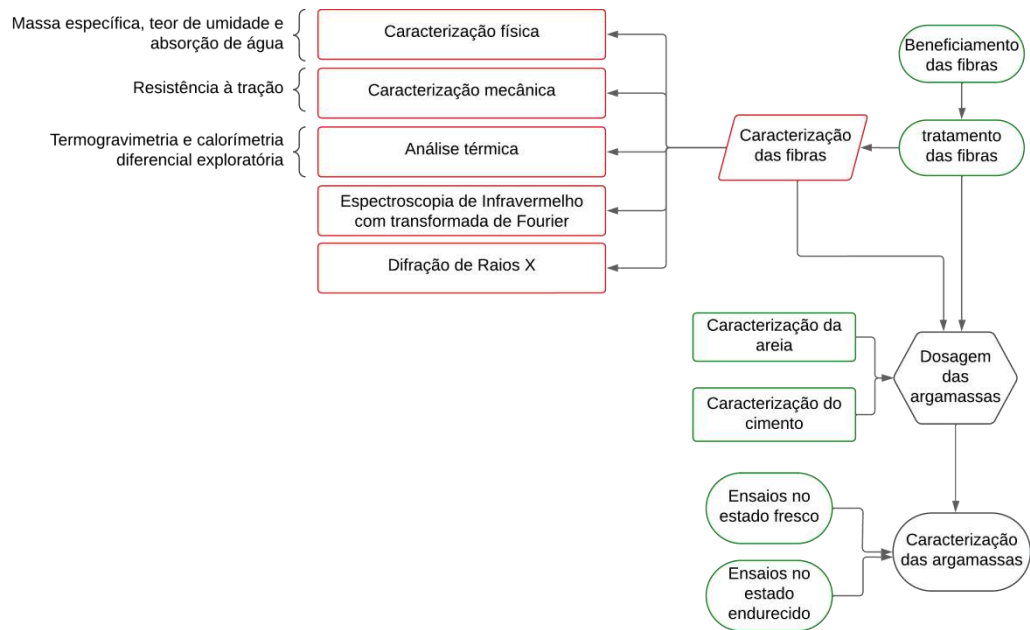
Os resultados dos ensaios de caracterização física da areia podem ser encontrados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Caracterização física da areia**

Propriedades	Norma	Resultados
Módulo de finura	NBR 17054 (2022)	2,12
Dimensão máxima de agregado (mm)	NBR 17054 (2022)	2,4
Massa específica (g/cm <sup>2</sup> )	NBR 16916 (2021)	2,53
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16972 (2021)	1,55

## 4.2 Métodos

As etapas que compõem a pesquisa estão identificadas no fluxograma da Figura 5, que esquematiza o programa experimental proposto.

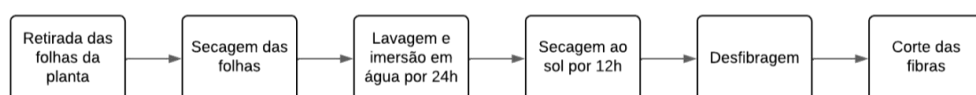
**Figura 5 – Fluxograma do Programa Experimental**

#### 4.2.1 Tratamento das fibras

O processo de beneficiamento das fibras, esquematizado na

Figura 6, foi desenvolvido com base nos procedimentos realizados por Junio *et. al* (2022). As folhas de carnaúba, conforme recebidas, foram submetidas ao processo de lavagem para remoção do excesso da cera presente na superfície, seguida por imersão em água por 24h, após esse período foi realizada a desfibragem das folhas que então colocadas para secagem ao ar livre por 12h.

O processo de desfibragem foi realizado manualmente, com o auxílio de ferramentas como facas, estiletes e tesouras, seguida pelo corte das fibras em tamanho médio de 12mm, comprimento adotado por ser a dimensão utilizada em fibras sintéticas comumente utilizadas como material de reforço em materiais cimentícios e espessura média de 700µm.

**Figura 6 – Etapas do Processo de beneficiamento das fibras de carnaúba**

Após o beneficiamento das fibras, o material foi submetido ao processo de tratamento alcalino, comumente usado em estudos sobre fibras vegetais aplicadas em materiais cimentícios (De Azevedo *et. al.*, 2021; Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria, 2023).

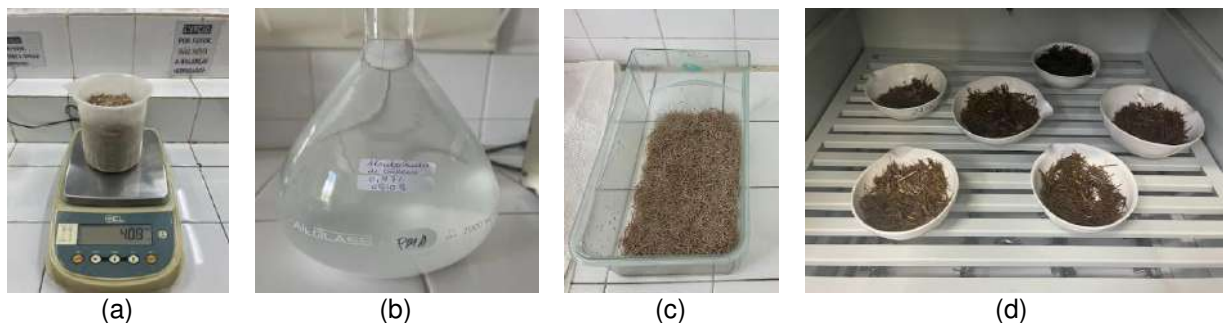
Na literatura também é possível encontrar resultados relacionados à aplicação desse tipo de tratamento em pesquisas realizadas com a fibra de carnaúba (Fernandes *et. al.*, 2011, Melo *et. al.*, 2012; Da Silva *et. al.*, 2018).

Para o presente estudo, adotou-se o processo de tratamento estabelecido por Ferreira *et. al.* (2015) em estudo sobre a durabilidade das fibras de sisal em materiais cimentícios, os autores utilizaram o tratamento alcalino por imersão em solução de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Para a presente pesquisa, os procedimentos foram realizados conforme etapas descritas a seguir.

As amostras foram inicialmente pesadas em uma balança com precisão de 0,1 g e imersas em uma solução com concentração de 0,73% em massa de  $\text{Ca(OH)}_2$ , utilizando um razão entre as fibras e a solução alcalina de 1:20, permanecendo nesta condição por 50 min. Após o período de imersão, as fibras foram retiradas da solução com o auxílio de uma peneira, colocadas em cápsulas de porcelana e secas em estufa a temperatura de 40°C por 48h após remoção completa da umidade superficial das amostras.

Após a secagem, as fibras foram retiradas da estufa e armazenadas em recipientes fechados, conforme ilustrado nas imagens da Figura 7.

**Figura 7** - Etapas do processo de tratamento das fibras (a) Pesagem das fibras (b) solução usada (c) recipiente com as fibras prontas para imersão (d) secagem em estufa



Verificou-se que após o tratamento as fibras adquiriram uma coloração mais escura, conforme Figura 8.

**Figura 8** - Aspecto da fibra moída em peneira com abertura 30MESH (a) antes e (b) após aplicação do tratamento



## 4.2.2 Caracterização da Fibra

### 4.2.2.1 Caracterização física da fibra

Os ensaios de caracterização foram realizados no laboratório de microbiologia do IFPB - Campus João Pessoa, os procedimentos foram realizados conforme detalhado nas seções seguintes.

#### 4.2.2.1.1 Massa específica

Para determinação da massa específica foram utilizadas fibras tamanho médio de 12 mm, previamente secas em estufa a 105°C por um período em que foi possível verificar a constância de massa, ou seja, quando não houvesse variação superior a 0,01% de massas após duas pesagens sucessivas no intervalo de 2h.

Após secagem, utilizando uma balança de alta precisão do modelo Shimadzu AU220, foram pesadas quatro amostras contendo 4,0 g de fibras e em seguida inseridas em frascos contendo 90 cm<sup>3</sup> de água, posteriormente cada conjunto foi reservado por 24 h para que o líquido preenchesse todos os vazios, eliminando a presença de bolhas. A Figura 9 ilustra as amostras utilizadas na determinação da massa específica.

**Figura 9** - Determinação da massa específica das fibras



Transcorrida a etapa anterior, foi realizada a aferição do nível da mistura no frasco para verificar o deslocamento do nível da água decorrente da inserção das fibras e posterior determinação da massa específica, conforme Eq. 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

- $\rho$  é a massa específica das fibras;
- $m$  é a massa da amostra;
- $v$  é a diferença entre o volume inicial do líquido colocado nos frascos e o volume aferido após imersão das fibras.

#### 4.2.2.1.2 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade os procedimentos foram realizados conforme especificado na Norma ASTM D2654 – 22. Duas amostras de fibras contendo 10,0 g de fibras foram pesadas em uma balança de alta precisão do Modelo Shimadzu AUY220 e colocadas em estufa a 105°C por 24h, visando verificar a constância de massa, após esse período foram feitas pesagens em intervalos de 2h, até que medidas feitas apresentassem variação inferior a 0,01%.

Verificada a constância de massa, a umidade da fibra foi determinada conforme a Eq. 2.

$$U = \frac{m_u - m_s}{m_u} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- U é o teor de umidade;
- $m_u$  é a massa da amostra úmida;
- $m_s$  é a massa da amostra seca.

#### 4.2.2.1.3 Absorção de água

Para determinar a absorção de água das fibras, três amostras contendo 2,0 g de fibras nas condições *in natura* e tratada, foram secas em estufa a 105°C até a verificação da constância de massa e, em seguida, imersas em água.

Procedendo-se então a sua pesagem depois de decorridos os tempos de 30 minutos, 24 horas e 7 dias.

O cálculo da absorção de água foi feito utilizando a Eq. 3.

$$Ab = \frac{m_{ht} - m_{st}}{m_{st}} \cdot 100 (\%) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

Ab é a absorção de água;

$m_{ht}$  é a massa úmida no tempo t;

$m_{st}$  é a massa da amostra na condição seca no início do ensaio;

#### 4.2.2.2 Análise Térmica

O ensaio termogravimetria foi realizado no laboratório de Síntese e Caracterização de Polímeros do NEPEM - Núcleo de Pesquisa de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, conforme metodologia detalhada a seguir.

Para a análise TG utilizou-se o analisador Termogravimétrico do Modelo HITACHI STA7300, amostras com cerca de 4 mg de fibras nas condições *in natura* e tratada, previamente moídas e peneiradas em peneiras com abertura de 100MESH,

foram acomodadas em cadinho de platina e escaneadas em atmosfera de gás nitrogênio a uma taxa de  $50\text{cm}^3.\text{seg}^{-1}$ , em um intervalo de temperatura de  $30^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}.\text{min}^{-1}$ .

Para o ensaio de calorimetria diferencial exploratório (DSC) utilizou-se o equipamento DISCOVERY DSC 25 DA TA INSTRUMENTS, o intervalo de temperatura adotado foi de  $30^\circ\text{C}$  a  $250^\circ\text{C}$ , com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}.\text{min}^{-1}$ , em atmosfera inerte de gás nitrogênio com taxa de  $50\text{ cm}^3.\text{seg}^{-1}$ . Foram analisadas amostras com 2,4 mg de fibras nas condições in natura e tratada acomodadas em cadinho de alumínio.

Para plotagem dos gráficos e tratamento dos dados obtidos nos ensaios foi utilizado o software Origin Pro 2024b.

#### **4.2.2.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

A análise de Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier permite a identificação da natureza das ligações químicas presentes no material, Conforme Fornari (2017), a técnica consiste em incidir radiação do espectro infravermelho em uma amostra de determinado material e quantificar a porção da energia aplicada que foi absorvida (absorbância) ou transmitida (transmitância) e relacionando-a ao tipo ligação química presente na amostra.

Nesse estudo, o ensaio foi realizado utilizando o equipamento do modelo INVENIO FT-IR SPECTROMETER BRUKER, no laboratório de síntese e caracterização de polímeros do NEPEM. Para preparação das amostras as fibras foram moídas e peneiradas em uma peneira de abertura de 100MESH, em seguida misturadas ao Brometo de Potássio (KBr) para confecção de pastilhas. As amostras preparadas foram submetidas à varredura nos comprimentos de onda de 4000 a  $450\text{ cm}^{-1}$ .

Os dados obtidos foram tratados com o software Origin Pro 2024b, gerando os respectivos espectros de transmitância (%) em função do número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ).

#### 4.2.2.4 Difração de raios-X

O ensaio de difração de raios-X foi realizado com o objetivo de determinar o índice de cristalinidade das fibras. De acordo com Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria (2023) a técnica é utilizada para identificar os minerais cristalinos nas fibras naturais quando seu teor é superior a 1%.

Nesse estudo a análise foi feita para a fibra nas duas condições estabelecidas (*in natura* e tratada) visando verificar a alteração do grau de cristalinidade do material em função do tratamento aplicado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da UFPB, utilizando um equipamento do modelo XRD6000-SHIMADZU, utilizando radiação  $K_{\alpha-Cu}$ , com voltagem de 30 kV e corrente elétrica de 30 mA, a varredura foi feita no intervalo  $2\theta$  contínuo de  $4^\circ$  a  $70^\circ$ , com uma taxa de varredura de  $2,0^\circ/\text{minuto}$ . As amostras utilizadas foram previamente moídas e peneiradas na peneira 200 mesh (abertura de 0,074 mm).

Para plotagem do difratograma no intervalo analisado foi utilizado o Software Origin Pro 2024b,

O índice de cristalinidade foi calculado de acordo com o método da altura do pico, conforme Eq. 4 proposta por Segal *et. al* (1959).

$$IC (\%) = [(I_{002} - I_{am})/I_{002}] \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

- IC expressa o índice relativo de cristalinidade;
- $I_{002}$  é a intensidade máxima da difração de rede 002 ( $2\theta = 22,6^\circ$ )
- $I_{am}$  é a intensidade de difração nas mesmas unidades em  $2\theta = 18^\circ$ .

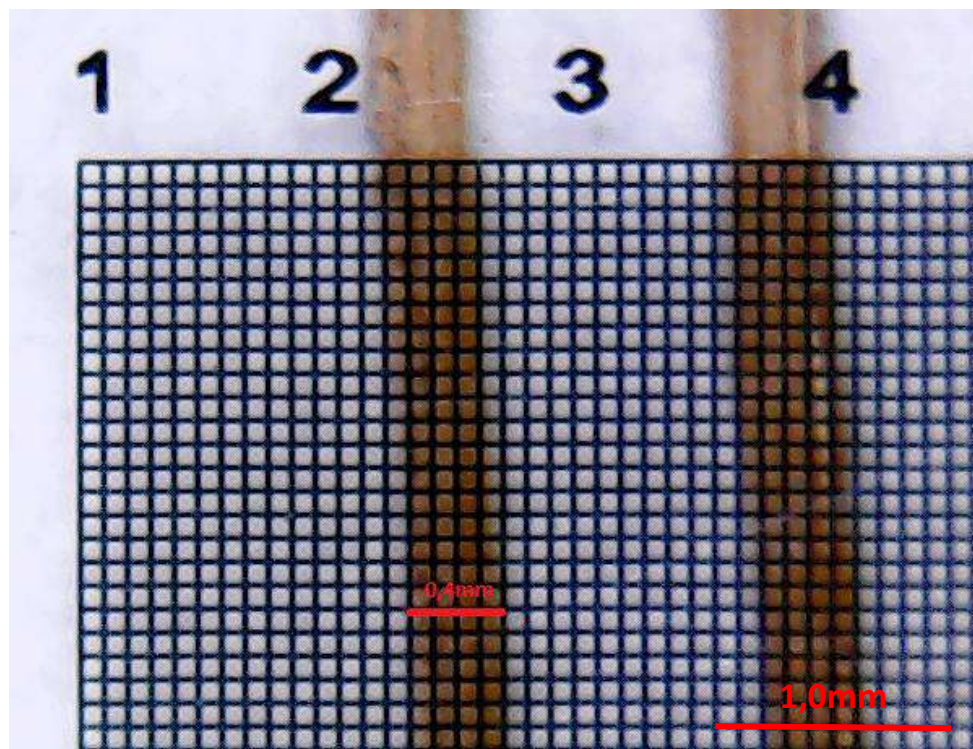
#### 4.2.2.5 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica das fibras foi feita através da determinação da resistência à tração para a fibra na condição natural e tratada, os procedimentos foram realizados em duas etapas.

Inicialmente foram selecionadas aleatoriamente 10 amostras de fibras para cada uma das condições analisadas. Escolhidas as amostras foi feita a análise de microscopia ótica da seção da fibra, nessa etapa foram adotados os procedimentos conforme Junio *et. al* (2022). Utilizando um microscópio digital de bancada com uma magnificação de 100x, foram feitas 5 medidas ao longo do comprimento da fibra nos diâmetros que formando ângulos de 0° e 90° com plano normal ao seu eixo longitudinal, a Figura 10 ilustra a medida do diâmetro de uma das amostras analisadas.

Os dados obtidos foram utilizados para determinar o diâmetro médio das fibras e a área da seção da fibra, para a sua determinação considerou-se que as fibras apresentavam formato elíptico, conforme observado em outros estudos sobre a sua morfologia (Junio *et. al*, 2022; Melo *et. al*, 2012).

**Figura 10** - Determinação do diâmetro médio das fibras



A etapa seguinte do ensaio consistiu na determinação das propriedades mecânicas das amostras, para realização do ensaio de tração direta na fibra utilizou-se como referência a norma ASTM C1557-14 (2014).

As fibras foram submetidas ao ensaio de tração a Máquina Universal de Ensaio Modelo Shimadzu AG-X, equipada com célula de carga de 10 kN, utilizando taxa de deslocamento de 3 mm/min com comprimento útil de 5,0 cm.

A resistência à tração das fibras (R) em mega pascal (MPa) foi calculada conforme

$$R = \frac{P}{A}$$

Onde:

- P é carga de ruptura expressa em newton (N);
- A é a área da seção transversal da fibra, determinada nas análises de microscopia, medida em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>);

#### **4.2.3 Dosagem e produção das argamassas**

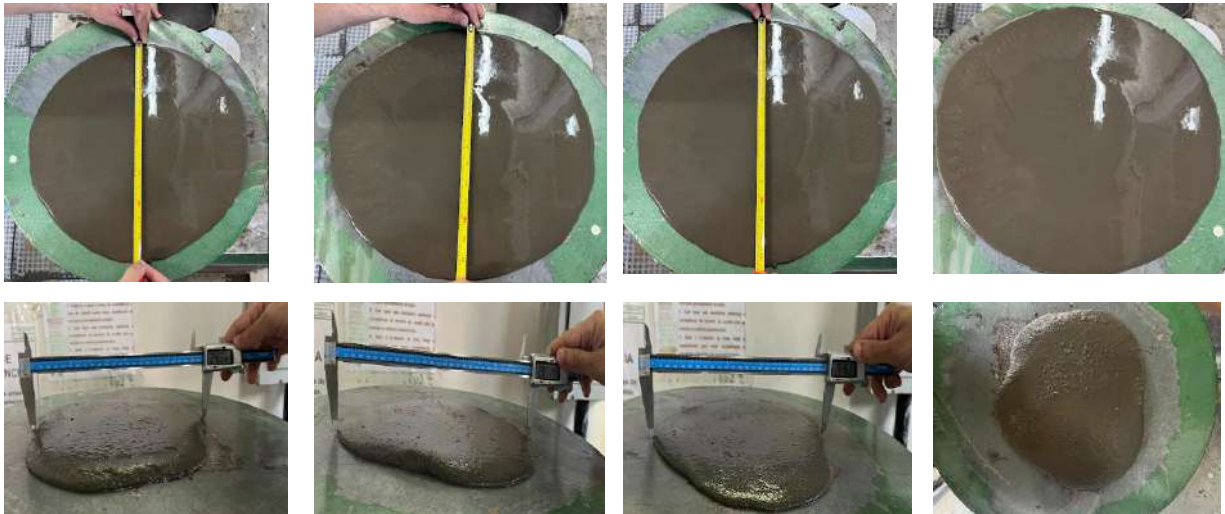
O estudo realizado da dosagem e produção das argamassas foi realizado no laboratório de Ensaio Mecânicos do IFPB Campus João Pessoa.

Para produção da argamassa foi adotado o traço de cimento e areia na proporção em massa dos materiais de 1:3.

Os primeiros estudos foram desenvolvidos com o objetivo de obter uma argamassa com índice de consistência de 260±5mm para argamassas de consistência padrão para aplicação em revestimentos conforme sugere a NBR 13276 (ABNT, 2016) utilizando os procedimentos indicados na norma e variando a relação do consumo de água cimento.

Para a argamassa de referência, sem adição de fibras, foram testadas as proporções de 0,72; 0,54; 0,62 e 0,56 para a relação de água/cimento das misturas, obtendo-se para esse último o índice de consistência médio igual a 262,77mm, utilizando-se o traço 1:3, as medidas dos testes realizados estão mostradas na Figura 11.

**Figura 11** - Ensaio do índice de Consistência realizado para dosagem da argamassa



Para dosagem de fibras foram adotados os teores de 0,5%, 1,0,% e 1,5% de fibra em relação ao volume de argamassa, a escolha dos percentuais está de acordo com as taxas usuais utilizadas em estudos sobre compósitos de matriz cimentícia (Priyadharshini, e Ramakrishna *et. al*, 2018; De Azevedo *et. al*, 2021; De Azevedo *et. al*, 2020).

No estudo da dosagem das argamassas foi mantido o fator de relação água/cimento constante para todos os teores de fibra estudados, como um dos objetivos da pesquisa foi investigar o efeito da variação do teor de fibra adicionada, optou-se pela manutenção dos parâmetros na relação dos materiais constituintes da matriz cimentícia constantes, conforme adotado por De Aquino *et. al* (2022) e De Azevedo *et. al* (2021).

Foram testadas as seguintes misturas de argamassa de referência (REF), sem adição de fibras, argamassa reforçada com fibras de carnaúba não submetidas ao tratamento alcalino proposto, nos teores de 0,5% (FNT-0,5), 1,0% (FNT-1,0) e 1,5% (FNT-1,5%) e argamassa reforçada com fibras de carnaúba submetidas a tratamento alcalino, nos teores de 0,5% (FT-0,5), 1,0% (FT-1,0) e 1,5% (FT-1,5%), conforme resumido na Tabela 5.

**Tabela 5-** Proporções das misturas de argamassa no traço 1:3

Mistura	F <sub>A/C</sub>	Traço	Aplicação do Tratamento	Teor de fibra
A-REF	0,56	1:3	-	0%
ARG FNT - 0,5%	0,56	1:3	Não	0,5%
ARG FNT - 1,0%	0,56	1:3	Não	1,0%
ARG FNT - 1,5%	0,56	1:3	Não	1,5%
ARG FT - 0,5%	0,56	1:3	Sim	0,5%
ARG FT - 1,0%	0,56	1:3	Sim	1,0%
ARG FT - 1,5%	0,56	1:3	Sim	1,5%

Os procedimentos de preparo das argamassas foram realizados de acordo com o sugerido por Ferreira *et. al* (2015). Todos os componentes secos (cimento, areia e fibras) devem ser homogeneizados no misturador mecânico durante 30 s, e em seguida foi adicionada a água aos poucos enquanto a mistura era realizada por 1 min em rotação baixa a uma frequência do motor de 820 rpm, depois disso o processo foi parado durante 30 s para remover e homogeneizar o material retido nas paredes do misturador, em seguida o processo continuou por 2 min em rotação alta com frequência de 1680 rpm.

A determinação da proporção dos materiais utilizados na pesquisa foi feita a partir dos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais constituintes da argamassa resumidos na Tabela 6.

**Tabela 6 -** Massa específica e unitária dos materiais constituintes

	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Cimento</b>	3,18	-
<b>Areia</b>	2,53	1,55
<b>Fibra</b>	1,28	-

O consumo dos materiais determinado para cada mistura está detalhado na Tabela 7.

**Tabela 7** - Determinação do consumo dos materiais

Mistura	Volume de Argamassa (cm <sup>3</sup> )	Relação A/C	Materiais			
			Cimento (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Água (g)
REF	1000	0,56	485,38	1456,14	0,00	271,81
FT0,5%	1000	0,56	482,95	1448,86	6,40	270,45
FT1,0%	1000	0,56	480,53	1441,58	12,80	269,10
FT1,5%	1000	0,56	478,10	1434,30	19,20	267,74
FNT0,5%	1000	0,56	482,95	1448,86	6,40	270,45
FNT1,0%	1000	0,56	480,53	1441,58	12,80	269,10
FNT1,5%	1000	0,56	478,10	1434,30	19,20	267,74

#### 4.2.4 Caracterização das Argamassas

Definidos os procedimentos de preparo e consumo de materiais para produção das argamassas, a etapa seguinte consistiu na execução dos ensaios de caracterização no estado fresco e no estado endurecido. A Tabela 8 apresenta a relação de ensaios realizados para os estudos das argamassas e parâmetros relacionados, os procedimentos de execução estão descritos nas subseções seguintes.

**Tabela 8** - Relação dos ensaios de caracterização das argamassas

Propriedade	Unidade	Dimensão do corpo de prova (mm)	Nº de amostras*	Idade (dias)	Norma
<b>Ensaio de caracterização no Estado Fresco</b>					
Índice de consistência	mm	-	1	-	NBR 13276/2016
Ensaio de retenção de água	%	-	1	-	NBR 13277/2005
Densidade de massa	kg/m <sup>3</sup>	-	2	-	NBR 13278/2005
Teor de ar-incorporado	%	-	2	-	NBR 13278/2005
Squeeze flow	Nxmm	Ø100	1	-	NBR 15839/2010
<b>Ensaio de caracterização no Estado Endurecido</b>					
Resistência	MPa	40x40x160	6	7; 28	NBR

<b>à compressão</b>					13279/2005
<b>Resistência à tração na flexão</b>	MPa	40x40x160	3	7; 28	NBR 13279/2005
<b>Módulo de elasticidade dinâmico</b>	GPa	40x40x160	3	28	NBR 15630/2008
<b>Absorção por capilaridade</b>	%	40x40x160	3	28	NBR 15259/2005
<b>Coefficiente de capilaridade</b>	%	40x40x160	3	28	NBR 15259/2005
<b>Absorção por imersão e índice de vazios</b>	%	40x40x160	3	28	NBR 9778/2009
<b>Variação Dimensional</b>	mm/m	25x25x285	3	28	NBR 15261/2005
<b>Resistência potencial à aderência</b>	MPa	-	12	28	NBR 13528/2019

\*Indica o número de amostras produzidas para cada teor de fibra adicionado;

#### 4.2.4.1 Ensaios no Estado Fresco

Para o presente estudo os ensaios no estado fresco foram determinados com o objetivo de avaliar o atendimento aos parâmetros classificatórios indicados na norma NBR 13281 (ABNT, 2023) que estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao revestimento de paredes e teto, as propriedades também foram avaliadas pelo ensaio de Squeeze Flow, normatizado pela NBR 13281 (ABNT, 2023) que pode contribuir para compreender como a adição da fibra de carnaúba afeta a mistura do ponto de vista da viscosidade e tensões de escoamento das argamassas em seu estado fresco.

Os procedimentos adotados para realização dos ensaios estão descritos nas subseções seguintes.

#### 4.2.4.1.1 Índice de Consistência

O ensaio tem como objetivo determinar o índice de consistência da argamassa, e foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016) descritos a seguir.

Imediatamente após a sua preparação, a argamassa foi utilizada para preencher um tronco de cone padrão, posicionado de forma centralizada sobre a mesa para índice de consistência, os aparelhos devem estar limpos e secos.

Segurando o molde firmemente, procedeu-se o seu preenchimento em três camadas, aplicando respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com soquete, de maneira a distribuí-la uniformemente, ao final, realizou-se o arrasamento do molde com uma régua metálica formando um ângulo de 45° em relação a superfície da argamassa, retirou-se o molde, e então utilizando a mesa de consistência, de forma manual, foram aplicados 30 golpes durante 30 s, verificando-se nesse momento o espalhamento da argamassa, as medidas foram registradas com o auxílio de um paquímetro, a medida foi tomada em três diâmetros tomados em pares de pontos distribuídos ao longo do perímetro, o índice de consistência da argamassa, corresponde à média das três medidas realizadas (Figura 12).

**Figura 12** - Procedimento de verificação do índice de consistência



#### 4.2.4.1.2 Ensaio de retenção de água

Ensaio realizado com o objetivo de determinar o percentual de retenção de água na argamassa e foi desenvolvido conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13277 (ABNT, 2005), conforme detalhado a seguir.

Após preparação da argamassa, utilizou-se um papel filtro previamente umedecido colocado sobre o fundo do prato, em seguida o conjunto foi colocado

sobre o funil de Buchner, e acionada a bomba de vácuo, aplicando ao conjunto uma sucção com pressão de 51 mmHg durante 90 s, abrindo-se a torneira para remoção do excesso de água do papel filtro, realizou-se então pesagem do conjunto registrando-se a massa do prato vazio com o papel filtro umedecido ( $m_v$ ).

Na etapa seguinte, o prato foi preenchido com argamassa e realizou-se o adensamento aplicando-se 37 golpes de soquete, sendo 21 na região das bordas e 16 na região central, posteriormente foi feito o arrasamento da argamassa sobre o prato para então realizar a pesagem do conjunto com a argamassa antes de proceder a sucção ( $m_a$ ).

Novamente, o prato foi colocado sobre o funil de Buchner e aberta a torneira para aplicação da sucção correspondente a 51 mmHg durante 15 min, fechando-a em seguida (Figura 13).

**Figura 13** - Aplicação da Sucção ao prato cheio de argamassa



Após a sucção o prato com a argamassa foi novamente removido do equipamento e pesado, registrando a massa após a sucção ( $m_s$ ).

A retenção de água foi calculada conforme a Eq. 5 e Eq. 6 e o resultado expresso em porcentagem.

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \right] 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$AF = \frac{m_v}{m + m_w} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

- $m_a$  é a massa do conjunto com argamassa;
- $m_s$  é a massa do conjunto após a sucção;
- $m_v$  é a massa do conjunto vazio;
- AF é o fator de água/argamassa fresca;
- $m_v$  é a massa total de água acrescentada á mistura;
- m é a soma das massas dos componentes anidros.

#### **4.2.4.1.3 Ensaio de densidade de massa e teor de ar-incorporado**

O ensaio utiliza o método pressiométrico e indica a quantidade de vazios com ar na argamassa, desenvolvido conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

Para realização do ensaio, cada mistura foi introduzida em um recipiente cilíndrico preenchido com 3 camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando-se a cada camada com uma espátula na posição vertical 20 golpes, posteriormente procede-se três quedas do recipiente, realizando-se em seguida o arrasamento da mistura para eliminar o excesso de material fora do volume do recipiente, registra-se a massa do molde preenchido com a argamassa fresca e procede-se os cálculos conforme especificado na norma para obtenção das propriedades.

#### **4.2.4.1.4 Ensaio de Squeeze Flow**

O ensaio de squeeze-flow consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas provocando a deformação radial da mistura, de acordo com Cardoso, Pileggi e John (2010) contribui para compreender o comportamento das argamassas durante o processo de aplicação, espalhamento e acabamento.

Normalizado pela NBR 15839 (ABNT, 2010), permite avaliar com precisão o grau de deformação das argamassas variando a velocidade de aplicação da carga.

Conforme a norma, para realização do ensaio foram utilizadas amostras com 10 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com velocidade de ensaio de 0,1 mm/s e 3

mm/s, avaliando a deformação das argamassas nos tempos de 10 min e 60 min e 15 min e 65 min, respectivamente.

Para realização do ensaio as argamassas foram preparadas no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – LABEME da UFPB, e ensaiadas utilizando a Máquina Universal de Ensaio - Shimadzu AG-X 10 kN do Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB.

A execução ocorreu de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010) com a aplicação de uma compressão na através de uma placa superior (punção) sobre uma placa inferior (base).

Inicialmente foi feita a moldagem da amostra com argamassa sobre superfície seca e limpa utilizando o molde e o gabarito. Utilizando a espátula, a massa foi acomodada uniformemente sobre o gabarito evitando a compactação do material e nivelando a superfície com a espátula para garantir um bom acabamento superficial. Procedeu-se a remoção cuidadosa do molde e do gabarito para preservar a forma da amostra, transportando a placa inferior com a amostra centralizada para a máquina universal de ensaios e acoplado a placa sobre a base, realizou-se então o início da aplicação da carga, conforme Figura 14.

**Figura 14** - Execução do Ensaio de Squeeze Flow



Os resultados squeeze-flow foram expressos como gráficos de carga versus deslocamento, plotados como auxílio do Software Origin pro 2024b.

#### 4.2.4.2 Ensaios no estado endurecido

Para as avaliações no estado endurecido serão considerados os ensaios determinados na norma NBR 13281/2023, conforme detalhado nas subseções a seguir.

##### 4.2.4.2.1 Resistência à tração na flexão e compressão axial

Realizados conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 13279 (ABNT, 2005), a resistência à tração na flexão e compressão axial foram avaliadas para as idades de 7 e 28 dias, sendo moldados 3 corpos de prova prismáticos nas dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada idade ensaiada e para cada tipo de mistura, variando o teor de fibra e a aplicação do tratamento alcalino, sendo moldados para estes ensaios de total de 42 corpos de prova.

A avaliação da resistência à tração na flexão foi feita utilizando a Máquina Universal de Ensaio - Shimadzu AG-X 10kN do Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB, através da aplicação de carga uniforme e sem choques com velocidade controlada a uma taxa de 50 N/s (Figura 15).

**Figura 15** - Máquina Universal de Ensaio montada para execução dos ensaios de Flexão



Para o ensaio realizado, a resistência à tração flexão  $R_f$  é calculada pela Eq. 7, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

$$R_f = \frac{1,5FL}{40^3} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

- F é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma expressa em newton (N);
- L é a distância entre os suportes medida em milímetros (mm);

Após rompimento à tração na flexão, as metades dos corpos de prova foram utilizados para testagem da resistência à compressão utilizando o equipamento para ensaios de resistência disponível no laboratório ensaios mecânicos do IFPB, aplicando cargas uniformes e sem choques com velocidade controlada a uma taxa de 500 N/s, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio conforme

Figura 16, de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga.

**Figura 16** - Ensaio de compressão axial



A resistência à compressão ( $R_c$ ) é calculada segundo a Eq. 8:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

- $F_c$  é a carga máxima aplicada expressa em newton (N);

#### **4.2.4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico**

Realizado conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 15630 (ANBT, 2008) trata-se de um ensaio não destrutivo que utiliza a propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos através de corpos de prova, para o presente estudo foram utilizados corpos de provas prismáticos de argamassa nas dimensões 4,0 cm x 4,0 cm x 16,0 mm.

O ensaio foi realizado utilizando o aparelho ultrassônico modelo PUNDIT LAB (+) da marca PROCEQ, o qual é composto por 02 transdutores de 54 kHz com diâmetro de superfície de contato de 36,77 mm ensaiados em três corpos de prova de argamassas para cada teor de fibra analisada nas condições tratada e não tratada totalizando análise de 21 corpos de prova;

Para realização do ensaio, os corpos de prova com idade de 28 dias, foram inicialmente pesados e medidos para determinação da sua densidade aparente, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), sendo verificado que as faces dos corpos de prova estava lisas e planas (superfícies de 4,0 cm x 4,0 cm), foi aplicada então uma camada de gel de contato na superfície dos transdutores do equipamento centralizados ao eixo do corpo de prova, após verificação da qualidade da medida, registrou-se o menor valor apresentado no aparelho de um total de 3 leituras efetuadas para cada corpo de prova.

O aparelho fornece valores correspondentes à velocidade do pulso ultrassônico e do tempo para que a onda atravesse o corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 17.

**Figura 17** - Execução do Ensaio de Ultrassom



Para determinação dos resultados a velocidade de propagação da onda é calculada conforme a Eq. 9:

$$V = L/t \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

- V é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressão em milímetros por microssegundos;
- L é a distância entre os pontos de acoplamento entre os transdutores expressa em milímetros;
- T é tempo registrado pelo mostrados digital, expresso em microssegundos;

Com os dados obtidos, o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado conforme a Eq. 10

$$E_d = \frac{v^2 \rho (1+\mu)(1+2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde

- $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico expresso em megapascal (MPa);
- $v$  é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressão em milímetros por microssegundos;

- $\rho$  é a densidade de massa aparente do corpo de prova expressa em  $\text{kg/m}^2$ ;
- $\mu$  é o coeficiente de poisson (adota-se 0,2);

#### **4.2.4.2.3 Ensaio de Absorção de água por capilaridade, Absorção por imersão e índice de vazios**

Os procedimentos para realização do ensaio de absorção por capilaridade foram executados conforme prescritos na NBR 15259 (ABNT, 2005), foram moldados 3 corpos de prova para cada teor de fibra adotado, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), totalizando 21 corpos de prova prismáticos de 4,0 cm x 4,0 cm x 16,0 cm.

Após a desmoldagem que ocorreu entre 24 h e 48 h da sua confecção os corpos de prova foram colocados em cura, até que se completasse o período de 28 dias, os corpos de prova foram lixados e limpos para então ser colocados em estufa a 105°C durante 24 horas, após retirados, aguardou-se que os corpos de prova atingissem a temperatura ambiente para então ser determinada a massa inicial ( $m_0$ ).

Em seguida, os corpos-de-prova foram então posicionados com face quadrada sobre suportes no recipiente de ensaio preenchido com água em nível constante evitando molhar suas superfícies laterais e verificando que o nível de água deve permanecesse sempre igual a  $5 \pm 1$  mm acima da face em contato com a água, conforme Figura 18.

**Figura 18** - Ensaio de Absorção por capilaridade



A verificação da absorção de água foi feita aos 10 min ( $m_{10}$ ) e 90 min ( $m_{90}$ ) de ensaio, contados a partir do momento da colocação dos corpos de prova em contato com a água. Antes de cada pesagem realizou-se a remoção do excesso de água com um pano úmido.

A absorção de água por capilaridade em cada tempo é calculada pela Eq. 11:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

- $A_t$  é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, expressa em gramas por centímetro quadrado;
- $m_t$  é a massa do corpo-de-prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas;
- $m_0$  é a massa inicial do corpo-de-prova, em gramas;
- $t$  corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos;
- 16 é a área do corpo-de-prova, em centímetros quadrados.

De acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005), o coeficiente de capilaridade (C) é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 min e aos 90 min, considerando-se como:

- Abscissa: a raiz do tempo, em minutos;
- Ordenada: a absorção de água por capilaridade, em gramas por centímetro quadrado.

O coeficiente de capilaridade é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e aos 90 min. O resultado para cada corpo-de-prova é calculado pela diferença entre as taxas de absorção aos 10 e 90min.

$$C = m_{90} - m_{10}$$

onde:

- C é o coeficiente de capilaridade, em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>).

Também foram analisados a absorção de água por imersão e o índice de vazios, os testes foram baseados na NBR 9778 (ABNT, 2009), para sua realização utilizou-se os mesmos corpos de prova usados no ensaio de absorção por capilaridade, inicialmente os corpos de prova foram mantidos em estufa por 72 horas, visando eliminar a umidade do material, decorrido esse tempo foi verificada a massa para registro da massa seca ( $m_s$ ), em seguida, promoveu-se a sua imersão em água também pelo período de 72 horas, após essa etapa, ocorreu a pesagem dos corpos de prova na condição submersa ( $m_s$ ), realizada com o auxílio de uma balança hidrostática.

Na última etapa, as amostras foram retiradas da água, enxugadas e pesadas para registro do seu peso saturado ( $m_{sat}$ ) com o auxílio de uma balança hidrostática.

A determinação da absorção de água por imersão é calculada através da Eq. 12:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

- A é a absorção de água por imersão em %;
- $m_{sat}$  é a massa saturada em g;
- $m_s$  é a massa seca em (g)

O índice de vazios é calculada através determinação da absorção de água por imersão é calculada através da Eq. 13:

$$I = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{sub}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

- I é o índice de vazios em %;
- $m_{sat}$  é a massa saturada em g;
- $m_s$  é a massa seca em g;
- $m_{sub}$  é a massa submersa em g;;

#### 4.2.4.2.4 Ensaio de Variação Dimensional (retração ou expansão linear)

Para avaliação da retração por secagem foram adotados os procedimentos estabelecidos na norma NBR 15261 (ABNT, 2005).

Para cada mistura estudada foram moldados 3 corpos de prova com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm, foram usados moldes de acrílico confeccionados nas dimensões requeridas. Para viabilizar a aferição das leituras as extremidades dos moldes foram dotadas de pinos metálicos. Após 48 h os corpos de prova foram desmoldados e mantidos a temperatura ambiente, sendo registradas leituras de massa por meio da pesagem dos corpos de prova e da variação dimensional dos corpos de prova nas idades de 0, 1, 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem,

A verificação da variação do comprimento com o auxílio de um equipamento dotado de um relógio digital conforme indicado na Figura 19. Para efetuação das leituras das medidas de comprimento, foi feita inicialmente a medição de uma barra metálica posicionada de forma centralizada a agulha do relógio, tomada como de referência para o comprimento inicial, realizando-se a tara do relógio com a barra na

posição de medida. Após esse procedimento a barra foi retirada e procedeu-se as medidas dos corpos de prova prismáticos.

**Figura 19** - Medidas dos corpos de prova no ensaio de retração



Para cada idade, a variação dimensional dos corpos de prova foi calculada de acordo com a Eq. 14:

$$\Delta m_1 = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

- $\Delta m_1$  é a variação de massa, arredondada ao décimo mais próximo, em porcentagem;
- $m_i$  é a massa na idade final, em gramas;
- $m_0$  é a massa após a desforma do corpo-de-prova, em gramas.

#### **4.2.4.2.5 Resistência de aderência à tração**

O ensaio deve ser realizado para avaliar a aderência superficial do revestimento sobre painéis de alvenaria com aproximadamente 1,0 m<sup>2</sup>, chapiscados e revestidas com as argamassas analisadas na pesquisa, conforme Figura 20.

**Figura 20** - Painéis confeccionados para execução do ensaio de resistência de aderência superficial (a) antes e (b) após a execução do revestimento



(a)



(b)

A resistência de aderência à tração das argamassas foi determinada conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 13528 (ABNT, 2019).

Para cada painel foram ensaiados 12 corpos de prova de mesmas características, os testes de aderência foram realizados após 28 dias da realização do revestimento, a distribuição dos corpos de prova foi feita de forma aleatória, respeitando os limites de espaçamento e afastamento das bordas do painel conforme recomendações da norma.

No dia anterior ao ensaio, com as superfícies limpas e secas, conforme Figura 21, foi feita a colagem das pastilhas metálicas com diâmetro igual a 50 mm.

**Figura 21** - Colagem das pastilhas para execução do ensaio de resistência à aderência superficial

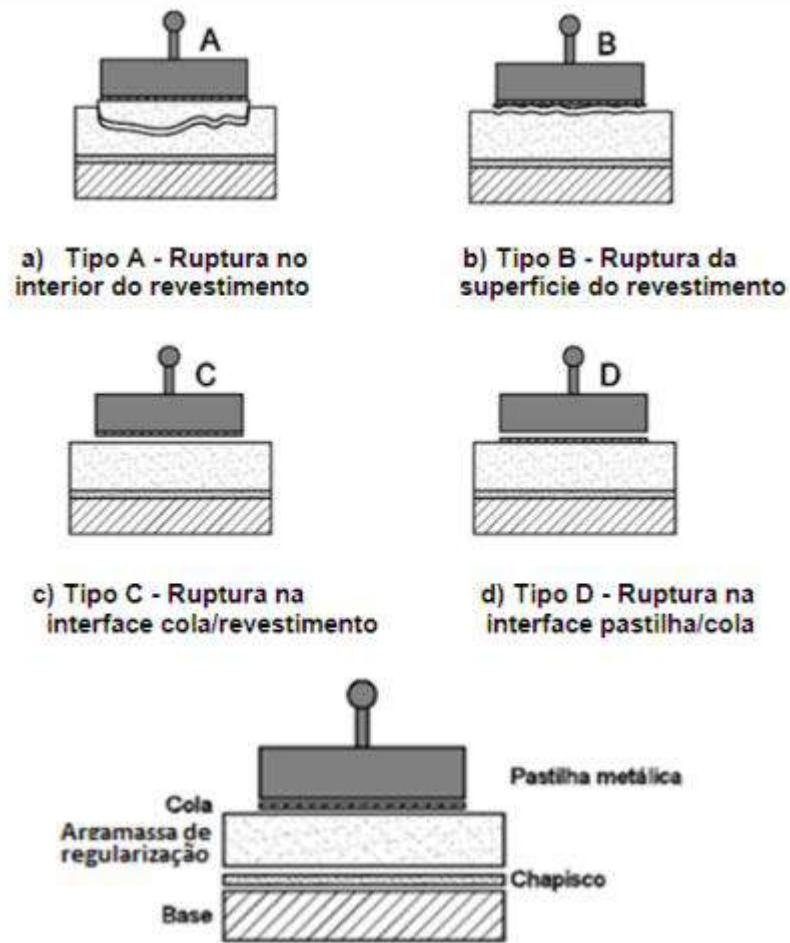


Para realização do ensaio de tração foi utilizado um aderímetro manual com capacidade 1200 Kgf, os resultados para cada corpo de prova foi anotada, registrando-se também a forma de ruptura no interior do revestimento, conforme detalhado a seguir:

- Tipo A – ruptura no interior do revestimento;
- Tipo B – ruptura da superfície do revestimento, onde partes da argamassa são arrancadas;
- Tipo C – ruptura na interface cola/revestimento, quando apenas poucos grãos são arrancados;
- Tipo D – ruptura na interface pastilha metálica/cola.

A Figura 22 a seguir ilustra as os padrões de ruptura possíveis:

**Figura 22** - Formas de ruptura dos corpos de prova



Fonte: NBR 13528-3 (ABNT, 2019)

A resistência á aderência superficial  $R$ , expressão em megapascal (MPa) foi determinada pela Eq. 15

$$R_s = \frac{P}{A} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

- $P$  é carga de ruptura expressa em newton (N);
- $A$  é a área superficial das pastilhas utilizadas no ensaio em milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ).

#### 4.2.4.3 Análise Estatística

Os dados obtidos nos ensaios foram tratados por análise estatística de variância (ANOVA) baseada na distribuição por amostragem do teste “F” de

Snedecor utilizado para identificar diferenças entre médias, conforme Vieira (2006), a análise será realizada com o auxílio do software *Origin Pro 2024*.

Nesse estudo a análise de variância aplicada para tratar os resultados dos ensaios mecânicos (resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade dinâmico),

Utilizando a metodologia adotada por Da Silva *et. al* (2018) e Junio *et. al* (2020) realizaram em seus estudos, será admitido um nível de confiança de 95%, onde a hipótese alternativa (H1) é assumida se o valor de F (calculado) é superior ao  $F_{\text{crítico}}$  (tabulado), concluindo assim que ao nível de significância de 5% se há diferença entre as médias dos resultados dos ensaios. Observando a ocorrência da diferença significativa entre os resultados encontrados, deverá ser aplicado o teste de Tukey para avaliar quantitativamente e realizar a comparação entre as médias obtidas para teor de fibras e aplicação do tratamento, dois a dois, verificando se é possível ou não rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias comparadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização das Fibras

Os ensaios de caracterização da fibra de carnaúba permitiram obter informações sobre suas propriedades que possibilitaram relacioná-las aos resultados encontrados no estudo das argamassas.

#### 5.1.1 Caracterização física da fibra

No estudo dos materiais cimentícios, a massa específica, o teor de umidade e a absorção de água das fibras são propriedades que afetam diretamente o desempenho das argamassas. Os resultados encontrados para a análise dessas propriedades físicas da fibra de carnaúba estão detalhados na Tabela 9.

**Tabela 9** - Propriedades Físicas da Fibra de Carnaúba

	Absorção (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Umidade (%)
<b>Fibra de Carnaúba</b>	167,93	1,28	10,36

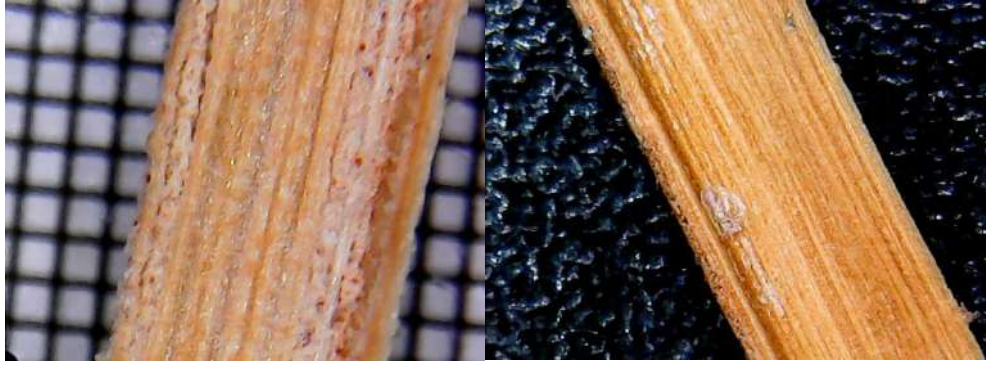
Os resultados encontrados corroboram com outros trabalhos sobre a fibra de carnaúba, Junio *et. al* (2022) estudaram a correlação entre a variação do diâmetro das fibras e suas propriedades físicas e mecânicas, obtendo uma massa específica de  $1,13 \pm 0,22 \text{g/cm}^3$ . Os autores observaram que fibras de maior diâmetro apresentavam menores valores de massa específica devido ao aumento da presença de vazios em seu interior, conforme pode ser observado nas imagens da Figura 23, obtidas com auxílio de um microscópio digital de bancada do Laboratório Materiais e Biosistemas da UFPB.

Com relação à capacidade de absorção de águas das fibras, Melo *et. al* (2012) destacam a importância do estudo dessa propriedade pois a alta hidrofiliabilidade das fibras vegetais são um fator limitante para sua aplicação em compósitos por produzir inchaço, aumento da massa e redução da resistência mecânica.

No caso dos materiais cimentícios especificamente, a alta absorção de água pelas fibras pode contribuir negativamente para o desempenho das argamassas tanto no estado fresco, por atuarem na redução da trabalhabilidade da mistura, conforme destacam Awoyera *et. al* (2022), como no estado endurecido afetando a resistência e a durabilidade, conforme Fernandes *et. al* (2011).

**Figura 23** - Fibra da Carnaúba





Para o presente estudo feita a análise da absorção de água nas fibras na sua condição natural e para a fibra tratada. Foram realizadas aferições aos 30min, 24h e 7 dias, os testes foram realizados em triplicata, os resultados podem ser encontrados na Tabela 10

**Tabela 10 - Absorção de água pelas fibras de carnaúba**

Material	Absorção (%)		
	Ab <sub>30min</sub>	Ab <sub>24h</sub>	Ab <sub>7dias</sub>
<b>Fibra não tratada</b>	136,52±4,14	177,38±2,28	188,05±7,92
<b>Fibra tratada</b>	121,25±5,98	158,4±32,87	188,47±11,60

Os resultados da absorção de água total das fibras de carnaúba corroboram com encontrados Fernandes *et. al* (2011), analisando a influência dos tratamentos com hexano, tetracloreto de carbono e alcalino com NaOH no total de água absorvido pelas fibras, os autores verificaram uma absorção de aproximadamente 180% ao término do processo para as fibras não tratadas e para todos os tratamentos analisados, no entanto, verificaram também a aplicação dos tratamentos contribuiu para retardar o processo, conforme observado no presente estudo onde a absorção foi mais rápida para as fibras não tratadas, esse resultado é benéfico para as argamassas, pois contribui para reduzir a absorção da água disponível na mistura para as reações de hidratação do cimento nos momentos iniciais.

### 5.1.2 Análise Térmica

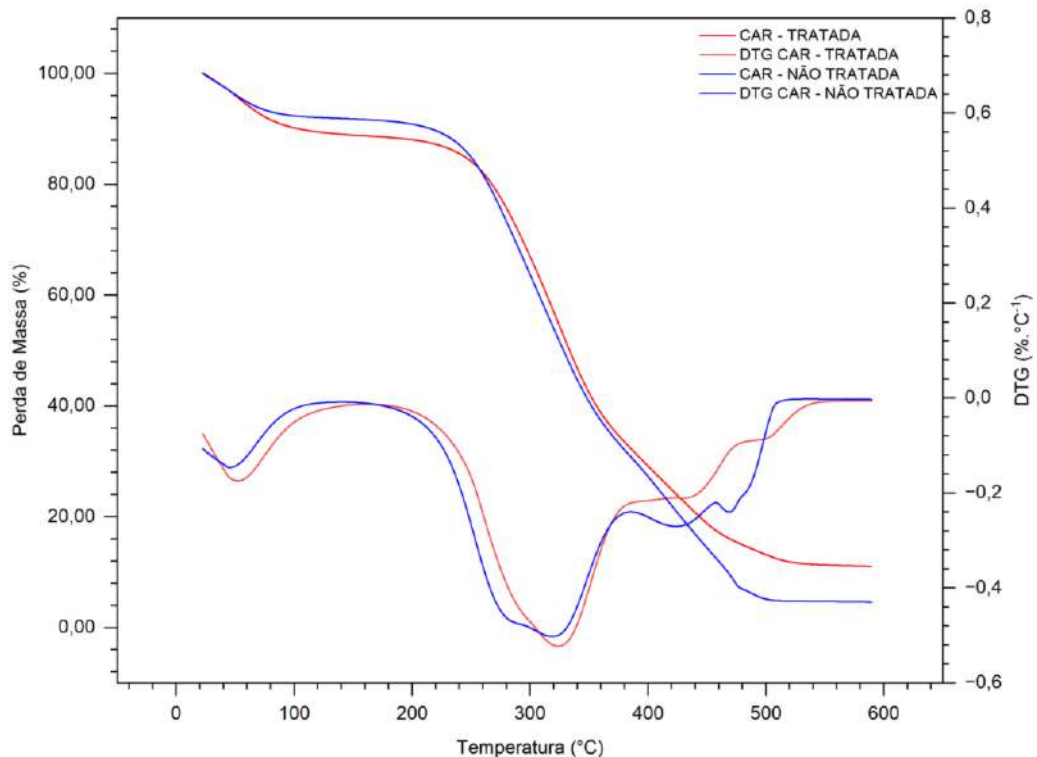
De acordo com Fornari (2017) a degradação térmica das fibras vegetais ocorre através de três eventos distintos relacionados à decomposição de seus principais constituintes, a celulose, hemicelulose e lignina. Para a hemicelulose, o

pico de degradação pode ocorrer na faixa entre 200°C a 260°C, é a molécula mais suscetível à elevação da temperatura por não apresentar estrutura molecular organizada que facilita a separação e destruição da sua estrutura, através da energia térmica adicionada ao sistema e o baixo peso molecular se comparada à celulose. A Celulose é o segundo principal componente na escala crescente de resistência ao calor, apresenta temperatura de degradação entre 240°C a 350°C, suas condições de arranjo molecular cristalino influenciam a resistência térmica, porém a região amorfa exige menor quantidade de energia. A lignina é composta por grupamentos fenólicos interligados, o resultando na estrutura mais resistente à degradação por calor entre os demais constituintes.

As curvas de Termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) estão representadas nos gráficos da Figura 24 e foram obtidas nas análises realizadas nesse estudo para as fibras de carnaúba nas condições (a) natural e (b) tratada.

No gráfico estão destacados os eventos de decomposição dos constituintes lignocelulósicos da fibra na condição natural. O primeiro evento observado foi relativo à evaporação da água responsável pela umidade natural da fibra, observou-se um crescimento da taxa de evaporação entre 30°C e 47,5°C, nesse intervalo houve perda de 3,4% de massa, a partir desse ponto é possível observar pela curva da DTG uma queda na taxa de evaporação, que foi mantida até a temperatura de 152°C, quando a perda de massa total de 9,34%, esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Fernandes *et. al* (2011) e estão de acordo com o percentual de umidade da fibra determinado na etapa de caracterização física, os autores relacionaram a perda de umidade observada à liberação da água absorvida ou combinada durante o processo de desidratação em razão da alta hidrofiliabilidade característica da fibra da palha da carnaúba.

**Figura 24** - Curva de análise térmica das fibras na condição natural e tratada



No segundo evento térmico a perda de massa total foi de 69,48%, sendo observados dois picos na curva de DTG, no intervalo entre 206° e 420°C, intervalo onde ocorre a degradação da hemicelulose e da celulose.

O terceiro evento ocorreu entre 420°C e 477°C, caracterizado pela degradação da lignina, nesse intervalo foi verificada uma perda de massa de 12,65%. Ao término do ensaio, a perda de massa total foi de 91,47%.

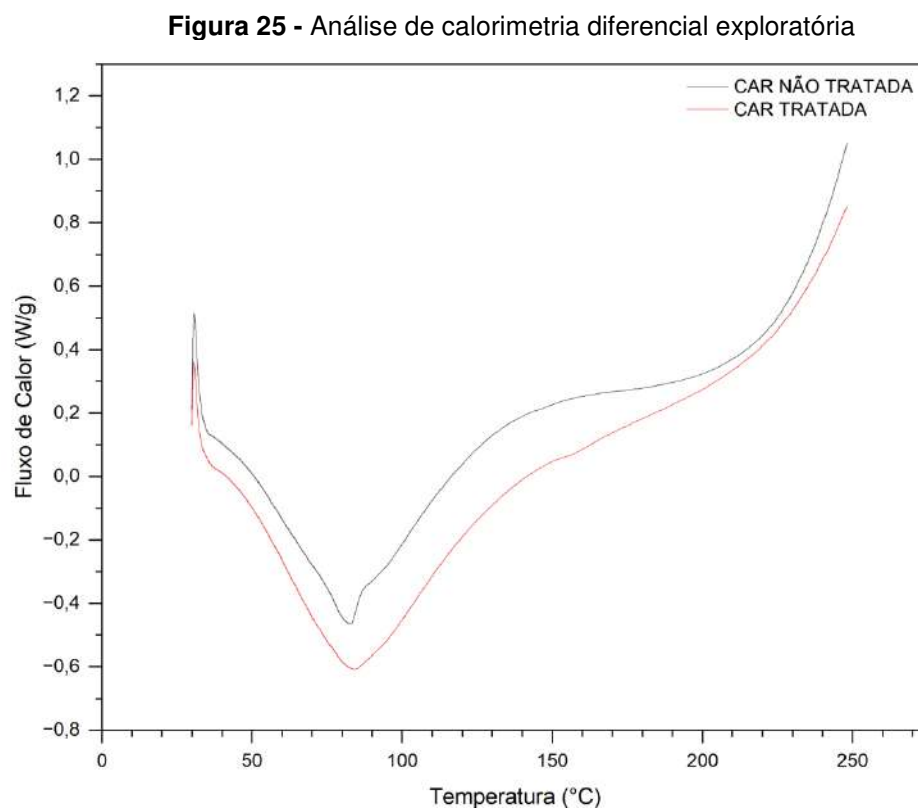
Os resultados obtidos para as fibras sem tratamento corroboram com os resultados encontrados por Junio *et. al* (2022), os autores identificaram uma perda de massa de 9,6% referente a perda de umidade das fibras entre 30°C e 200°C. No intervalo entre 200°C e 414°C, uma perda de massa total de 53,5% decorrente da degradação da celulose e da hemicelulose e por fim a perda de 11,6% decorrente da degradação da lignina.

A curva de TG e DTG obtidas para a fibra na condição tratada indicou que o primeiro evento, relacionado a evaporação da água presente nas fibras correspondeu a perda 11,69% da massa total das fibras até a temperatura de cerca de 200°C, o acréscimo do teor de umidade corrobora com os resultados observados por Fernandes *et. al* (2011), no estudo, os autores identificaram que os maiores teores de umidade observados ocorreram para as fibras que receberam o

tratamento alcalino com NaOH, isso indica que o tratamento aplicado contribui para o aumento da resistência da fibra à perda de umidade. O segundo evento, envolveu a degradação de dois constituintes, a hemicelulose e a celulose, que ocorreram no intervalo de 200°C a 420°C, com perda de 63,92% da massa total. O terceiro evento de decomposição ocorreu na entre 420°C e 477°C, verificando-se uma perda de massa associada de 11,07% decorrente da degradação da lignina, a perda total de massa foi 86,68%. Os resultados obtidos estão de acordo outros estudos que analisaram a estabilidade térmica das fibras de carnaúba submetidas à tratamentos, como Fernandes *et. al* (2011).

Comparando os resultados das fibras nas duas condições analisadas, foi verificada uma redução nos teores de hemicelulose e de lignina.

O ensaio de DSC evidenciou a ocorrência de um pico endotérmico na temperatura igual a 83°C, conforme Figura 25.



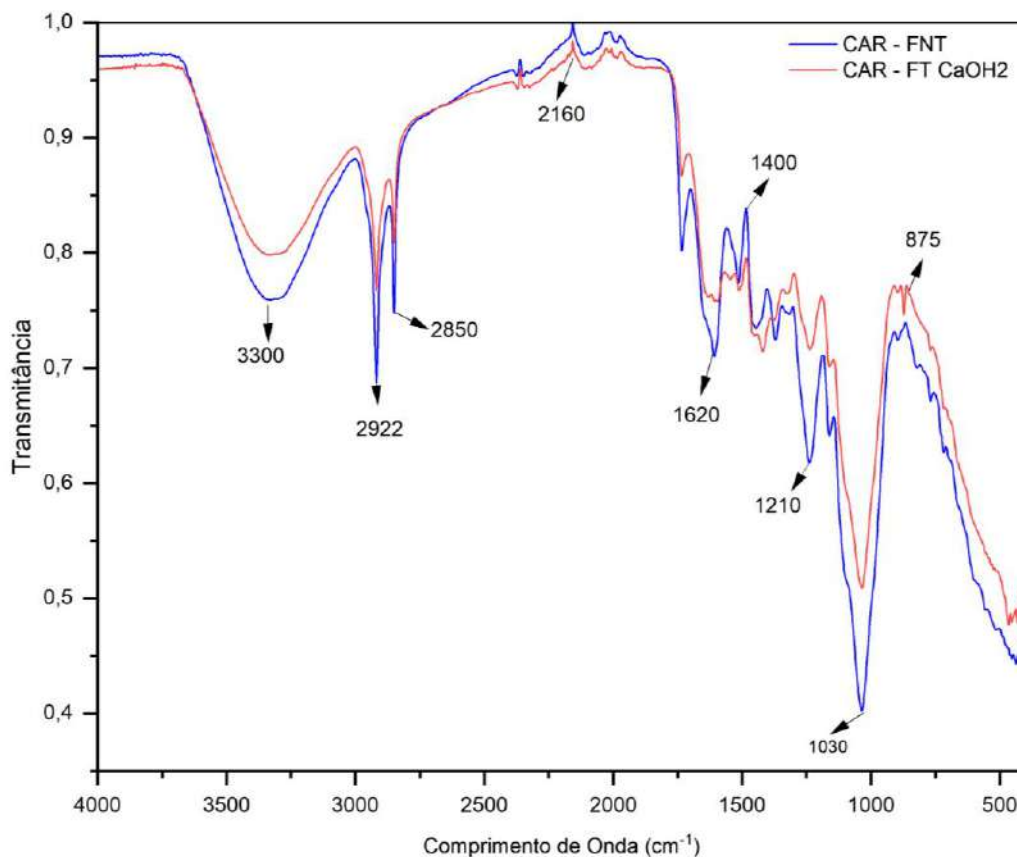
Conforme destacam Junio *et. al* (2023) o pico endotérmico observado está relacionado à liberação da umidade aderida à superfície hidrofílica. O acréscimo da taxa no fluxo identificado para as fibras tratadas indicam o aumento da resistência

térmica à perda da umidade da fibra, que confirmam os resultados encontrados na análise de termogravimetria.

### 5.1.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os gráficos da Figura 26 apresentam os espectros encontrados na análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier para as fibras de carnaúba na condição natural e na condição tratada.

**Figura 26** - Espectros de FTIR para fibras de carnaúba na condição natural e tratada



A análise das curvas permitiu identificar que os espectros observados para a fibra de carnaúba natural é semelhante ao de outras fibras vegetais, como a fibra de sisal (Ferreira *et. al*, 2015), a fibra de açai (Azevedo *et. al*, 2021), e a fibra da folha do coco (Surnam e Imrith, 2023), onde se verificou que o tratamento alcalino contribuiu para redução nos picos, principalmente nas bandas observadas em 3300cm<sup>-1</sup>, e 1030cm<sup>-1</sup>. Resultado semelhante ao observado no presente estudo, essas bandas estão associadas respectivamente ao grupo OH e à deformação do

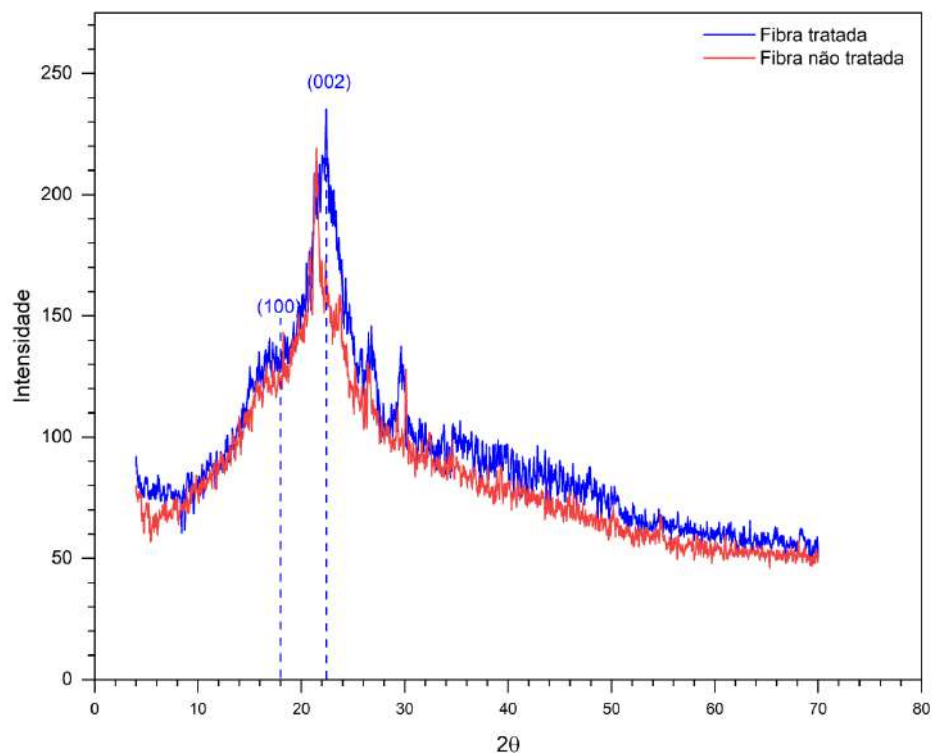
álcool secundário e éter alifático, conforme descreve Fornari (2017), o que indica um enfraquecimento dessas ligações decorrentes do processo de tratamento aplicado.

Os picos relacionados as bandas  $2922\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas aos grupos  $\text{CH}_2$  comumente observados nas moléculas de celulose e hemicelulose (Junio *et. al*, 2022), a alteração observada na intensidade dos picos revele o efeito do tratamento aplicado nas fibras.

#### 5.1.4 Difração de raios-X

Os difratogramas obtidos na análise de DRX da fibra natural e tratada estão apresentados na Figura 27.

**Figura 27** - Difratograma da fibra de Carnaúba natural e tratada



Para a fibra de carnaúba, de acordo com da Silva *et. al* (2017), o pico de difração correspondente a rede 002 ocorre para  $2\theta = 22,5^\circ$  e a pico de intensidade da linha de base correspondente a rede 001 ocorre para  $2\theta = 18^\circ$ .

A Tabela 11 apresenta os dados de intensidade dos picos para as redes 002 e 001.

**Tabela 11** - Intensidade dos picos das redes 001 e 002 identificados na DRX

<b>Material</b>	<b>2<math>\theta</math> = 18°</b>	<b>2<math>\theta</math> = 22,5</b>
Fibra não tratada	119,6	157,6
Fibra tratada	130,4	214,0

Assim, para a fibra na condição natural obteve-se um índice de cristalinidade igual a 24,11% e para a fibra tratada o índice de cristalinidade de 39,06%, sendo verificado que o pré-tratamento aplicado aumentou o índice de cristalinidade da fibra.

O índice de cristalinidade encontrado nas análises foi semelhante ao observado por Alcivar-Bastidas, Petroche e Martinez-Echevarria (2023) para as fibras de abacá na condição natural e submetidas a tratamento alcalino com NaOH, os autores atribuíram o acréscimo à eficiência do tratamento aplicado às fibras na remoção do material não cristalino, como a hemicelulose e a lignina, também verificados no presente estudo conforme indicado na análise de termogravimetria, mesmo resultado obtido por Ferreira *et. al* (2015).

O aumento da cristalinidade do material tem efeito positivo para os compósitos cimentícios, conforme destaca De Aquino *et. al* (2022), contribui para o aumento da adesão da fibra à matriz cimentícia.

No estudo da incorporação de fibras à materiais cimentícios Marvila *et. al* (2021) explicam que as fibras mais cristalinas tem melhor resistência e apresentam melhor molhabilidade na matriz favorecendo a adesão entre os dois componentes.

### **5.1.5 Caracterização Mecânica**

Os resultados do ensaio de tração direta realizado para caracterização mecânica são apresentados na Tabela 12, que também traz dados encontrados em outros estudos sobre as fibras de carnaúba.

**Tabela 12** - Resistência à tração direta das fibras de carnaúba

<b>Material</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Alongamento máximo</b>	<b>Referência</b>
Fibra de carnaúba natural	322,79±117,39	4,69±0,87	Presente estudo
Fibra de carnaúba tratada com CaOH <sub>2</sub>	144,48±90,09	2,50±1,44	Presente estudo
Fibra de Carnaúba natural	234,5±29,50	2,15±0,45	Melo <i>et. al</i> (2012)
Fibra de Carnaúba tratada com peróxido	195,00±47,00	2,15±0,45	Melo <i>et. al</i> (2012)
Fibra de Carnaúba natural	64.7 ± 40.9	5.59 ± 1.6	Junio <i>et. al</i> (2022)

A comparação dos resultados obtidos nessa pesquisa com outros trabalhos que estudaram as propriedades mecânicas das fibras de carnaúba evidenciam a variabilidade dos dados, que pode ser explicada pela heterogeneidade do material, assim como outros fatores relacionados como a forma de preparo e obtenção das fibras, Junio *et. al.* (2022) verificaram que existe uma variação das propriedades mecânicas das fibras com a variação diametral foi confirmada, explicado pela presença dos vazios internos observados na estrutura do material.

Quanto a influência do tratamento realizando das fibras, o estudo de Melo *et. al* (2012) indicou que houve uma redução na resistência da fibra para todos os tipos de tratamento analisados no estudo, também foi observado nesta pesquisa, relacionada ao processo de mineralização da fibra devido a deposição dos íons de cálcio da solução alcalina utilizada no processo de tratamento nos vazios da fibra.

## **5.2 Caracterização das argamassas**

### **5.2.2 Ensaio no Estado Fresco**

Os resultados dos ensaios realizados possibilitaram compreender o comportamento no estado das argamassas com diferentes teores de adição de fibra. Conforme Priyadharshini e Ramakrishna (2018) destacam, não há ensaios unificados que permitam conhecer o comportamento das argamassas em seu estado fresco, no entanto, através dos ensaios realizados foi possível obter

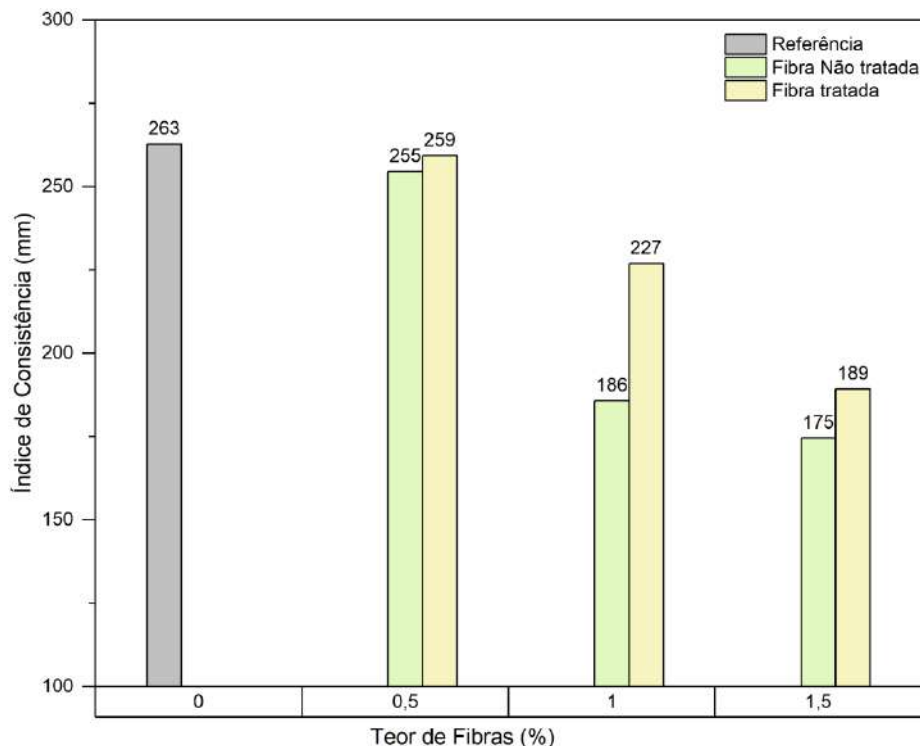
informações úteis que contribuirão para a caracterização reológica das misturas analisadas com relação aos aspectos de fluidez, coesão e tensão de escoamento das misturas.

### 5.2.2.1 Índice de Consistência

De acordo com o Awoyera *et. al* (2022) a consistência é uma característica física fundamental para o desempenho das argamassas. Segundo os autores, a capacidade de absorção de água pelos materiais constituintes e a coesão entre as partículas afeta a trabalhabilidade da mistura, como é o caso das fibras naturais, que têm caráter altamente hidrofílico, utilizadas na produção das argamassas.

O gráfico da Figura 28 traz os dados referentes ao índice de consistência obtido para cada mistura.

**Figura 28 - Índice de Consistência das Misturas**



A NBR 13276 (ABNT, 2016) especifica o método de determinação do índice de consistência de argamassas, até 2016, quando a norma foi atualizada, de acordo com De Aquino *et. al* (2022), havia a recomendação de que as argamassas apresentasse o índice de espalhamento na mesa de consistência igual a  $260 \pm 10$

mm. Para os resultados encontrados nessa pesquisa, para as argamassas com adição de fibras, apenas a mistura com percentual de 0,5% de fibra tratada manteve-se dentro dos limites recomendados. Resultado semelhante foi observado para as misturas com 0,5% da fibra na condição natural, podendo considerá-la também dentro desse limite. Com a atualização da referida norma ocorrida em 2016, esses limites não são mais obrigatórios, no entanto, trata-se um parâmetro importante para avaliação trabalhabilidade das argamassas, na Figura 29 é possível observar o aspecto das misturas produzidas.

**Figura 29** - Ensaios de índice de consistência das misturas analisadas

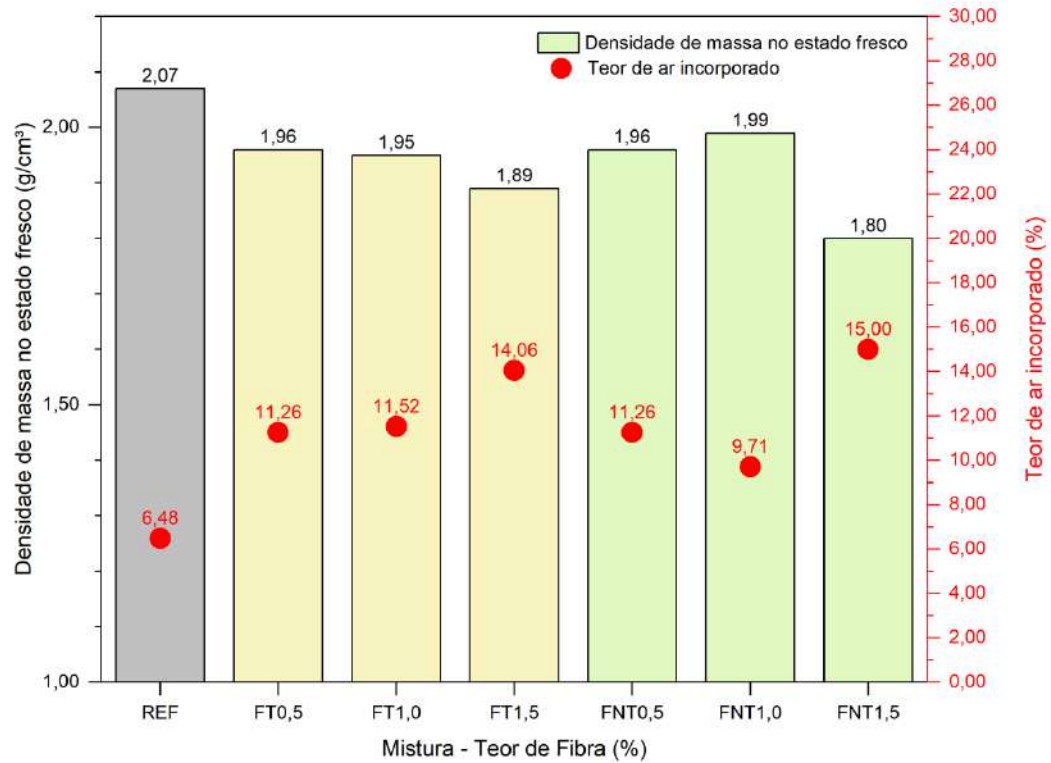


Observou-se que a adição das fibras contribuiu para melhorar a coesão argamassas. Em contrapartida, prejudicou a sua trabalhabilidade, a alta hidrofiliabilidade verificada nos ensaios de caracterização das fibras contribuíram para a absorção da água disponível para a hidratação do cimento e formação da pasta nas argamassas. As misturas com teor de fibras de 1,5% apresentaram acentuada segregação das fibras e exsudação da pasta de cimento.

Quanto à influência do tratamento realizado nas fibras, para o mesmo teor de fibra adicionado verificou-se que melhor trabalhabilidade das argamassas com fibras tratadas. De Azevedo *et. al* (2021) observaram que aplicação de tratamento superficial nas fibras aumentaram a sua rugosidade, contribuindo para a adesão interfacial entre o reforço (fibra) e a matriz (argamassa), favorecendo a ancoragem à matriz e por consequência a redução da fluidez da argamassa. No presente estudo, a adição das fibras contribuiu para a redução da fluidez quando comparada a argamassa de referência. O tratamento aplicado às fibras contribuiu para a remoção da cera presente na superfície da fibra, melhorando o mecanismo de adesão à matriz produzindo uma mistura mais coesa e mais trabalhável com relação as que utilizaram a fibra em sua condição natural. Ressalta-se também que na etapa de caracterização física da fibra foi verificado que o tratamento contribuiu para retardar o processo de absorção de água pela fibra, contribuindo a fluidez do conjunto.

#### **5.2.2.2 Densidade de massa e teor de ar-incorporado**

As fibras vegetais são materiais de baixa densidade quando comparadas aos materiais que compõem as argamassas. Em revisão sobre a adição de fibra de coco em materiais cimentícios, Ali *et. al* (2022) verificou que há um declínio na densidade dos compósitos em função da adição de fibras, isso ocorre porque, nas argamassas, as fibras são incorporadas substituindo-a parcialmente, ocasionando a redução da densidade do compósito formado pelos dois materiais. A análise do gráfico da Figura 30 indica que conforme esperado, todas as argamassas com adição de fibras de carnaúba apresentaram densidade de massa no estado fresco inferior à referência.

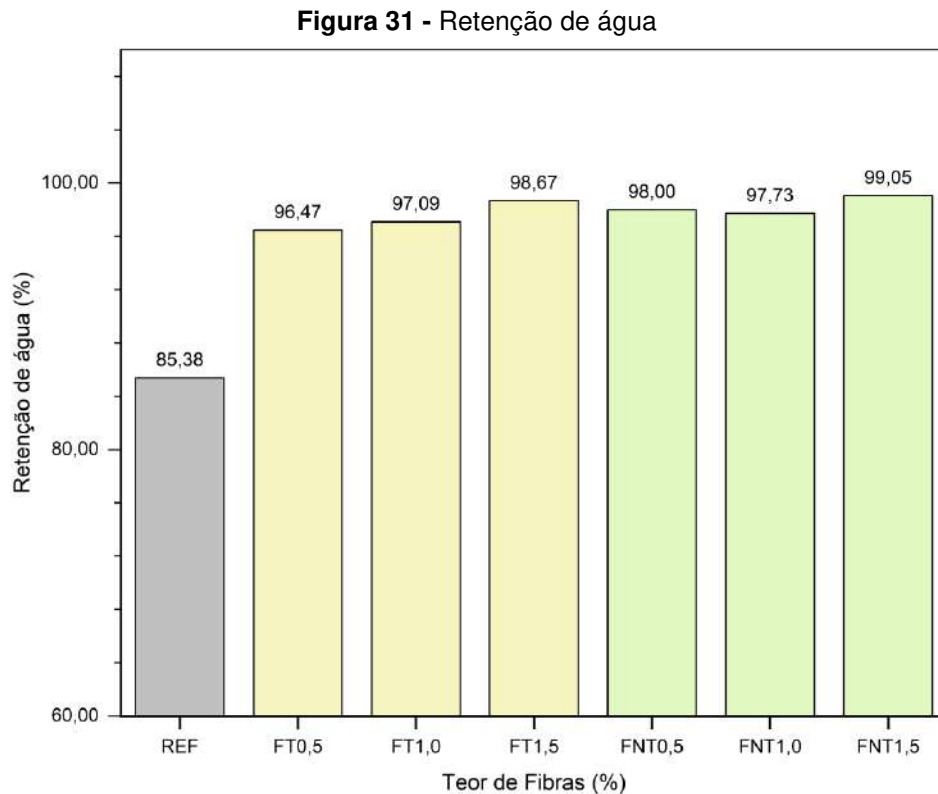
**Figura 30 - Densidade de massa e Teor de ar incorporado**

Outra razão para redução da densidade fresca está relacionada ao teor de ar incorporado à mistura, que apresentaram maiores valores conforme o acréscimo na quantidade de fibra adicionada, indicando a presença de vazios no interior da massa fresca.

Conforme Pereira *et. al* (2024) esse acréscimo está relacionado à expansão da zona de interface fibra-matriz onde a adesão não ocorre totalmente ao longo da superfície e onde há absorção da água de amassamento pela fibra, favorecendo a formação de vazios no interior da mistura.

### 5.2.2.3 Retenção de água

A retenção de água é outro parâmetro que se relaciona à trabalhabilidade das argamassas. Conforme o gráfico da Figura 31, todas as argamassas com adição de fibras apresentaram índice de retenção de água superior à referência.



Todos os resultados determinados para o índice de retenção foram superiores a 95%, valores que segundo Pereira *et. al* (2024) são benéfico para as argamassas de revestimento, pois contribuem para a redução do fenômeno de retração por secagem da mistura. Os resultados encontrados podem ser atribuídos ao processo de absorção de água pelas fibras.

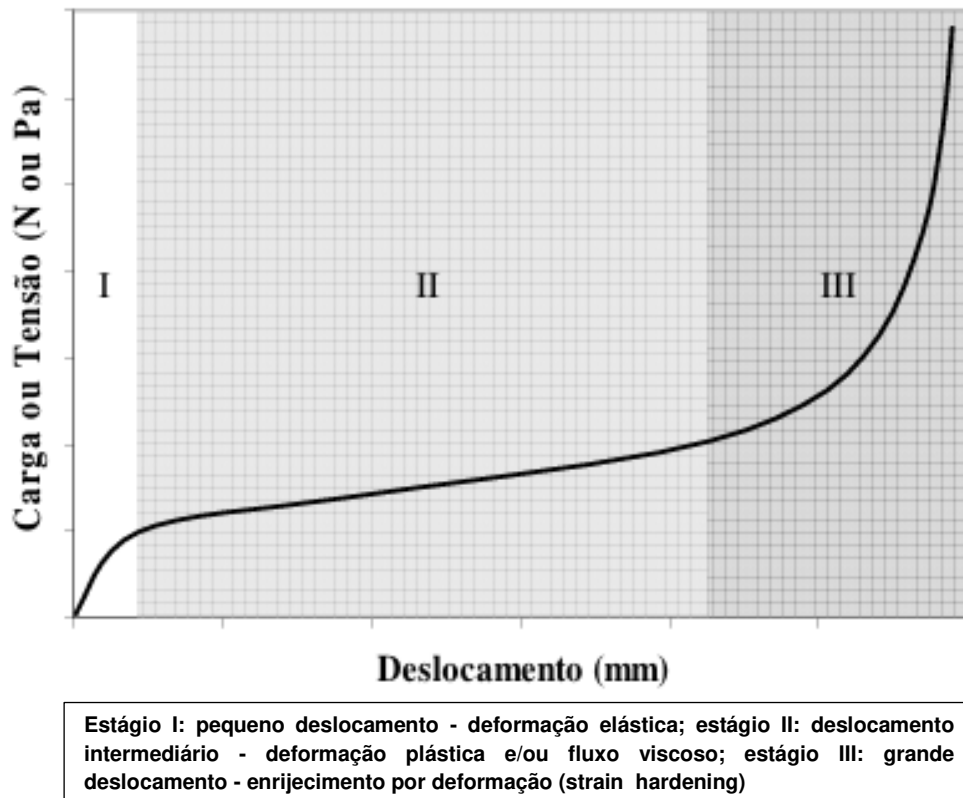
No presente estudo todas as misturas apresentaram retenção de água superior a 75%. De acordo com De Azevedo *et. al* (2020) o total de água retido pode ser prejudicial à adesão da matriz ao substrato, no entanto, salienta-se que no caso das misturas estudadas a água retida encontra-se aderida a fibra e não livre na pasta, impedindo o efeito negativo mencionado pelos autores.

#### 5.2.2.4 Squeeze Flow

O ensaio de squeeze flow consiste na compressão de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas provocando a deformação radial da mistura. De acordo com Cardoso, Pileggi e John (2010) o ensaio contribui para simular as cargas e deformações envolvidas no processo de aplicação das argamassas e compreender o seu comportamento nas etapas de espalhamento,

quando a argamassa é solicitada em altas taxas de cisalhamento e grandes deformações, nivelamento e acabamento, quando o material é submetido a deformações e taxas de cisalhamento variáveis. O perfil típico das curvas de squeeze flow pode ser observado na Figura 32.

**Figura 32** - Perfil típico de do ensaio de squeeze-flow realizado com deslocamento controlado



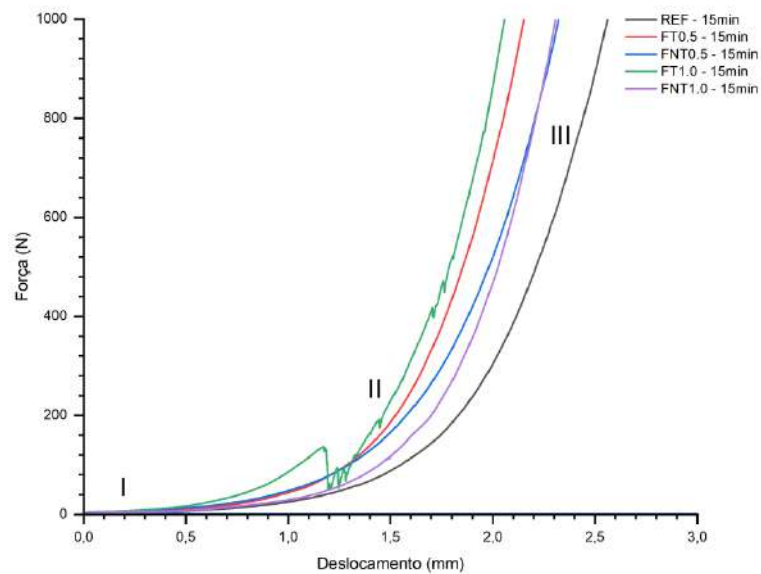
Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2010)

Nesta pesquisa, o comportamento das argamassas foi avaliado nas velocidades de aplicação de carga de 0,1 mm/s nos tempos de 15 min e 65 min após o preparo de cada mistura, e na velocidade de 3,0 mm/s nos tempos de 10 e 50min após o preparo de cada mistura. De acordo Cardoso, Pileggi e John (2010) essas velocidades de aplicação de carga simulam fenômenos de ordem prática.

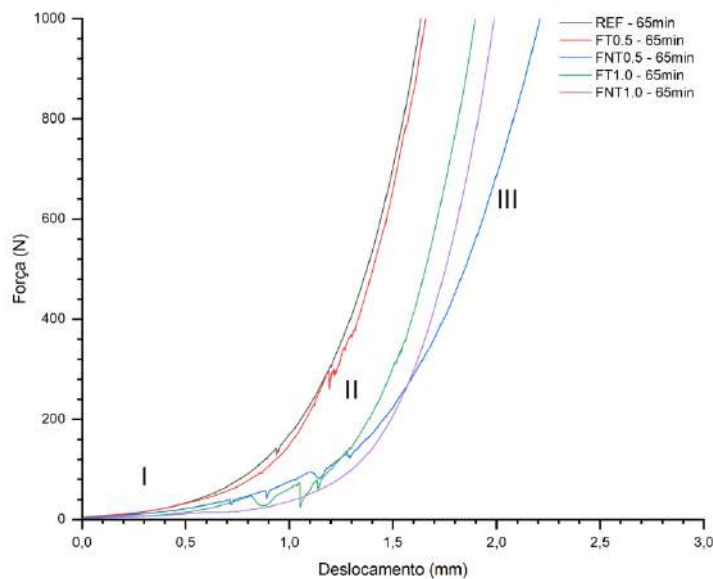
Em razão da pouca trabalhabilidade verificada nos ensaios de consistência, optou-se por não realizar o ensaio nas misturas com adição de 1,5% de fibra.

Os resultados do ensaio com taxa de solitação igual a 0,1 mm/s estão mostrados no gráfico da Figura 33.

**Figura 33** - Ensaio de Squeeze Flow para taxa de carregamento de 0,1mm/s (a) após 15 min da mistura e (b) após 65min da mistura



(a)



(b)

De acordo com os resultados, na Figura 33.a, para a velocidade de 0,1 mm e 15 min após o preparo das argamassas, a mistura que apresentou as maiores deformações foi a argamassa de referência, a deformação máxima obtida foi de 2,5 mm, a argamassa que apresentou o melhor comportamento plástico característico da zona II foi a REF e FNT1,0 no intervalo de deformação entre de 0,5 mm a 1,0 mm. Analisando o comportamento das misturas na zona III, observou-se que as

cargas máximas foram atingidas mais rapidamente para as argamassas reforçadas com fibras. Comparando as misturas com adição de fibras verificou-se que as que receberam tratamento apresentaram mais resistência ao deslocamento e acréscimo de cargas evidenciando a maior coesão e enrijecimento da mistura, que pode ser relacionada à melhor adesão com das fibras com a matriz.

Para a velocidade de carregamento de 0,1mm e tempo de preparo da mistura de 65 min, mostrados na Figura 33.b a situação se inverteu, a mistura de referência nesse caso apresentou o menor deslocamento máximo, apresentando uma curva muito semelhante à argamassa do tipo FT-0,5%, seguida pela Argamassa FT-1,0, evidenciando pelo aumento das cargas e mudança de perfil após 65 minutos o efeito da consolidação das misturas no decorrer do tempo e a manutenção da coesão da mistura.

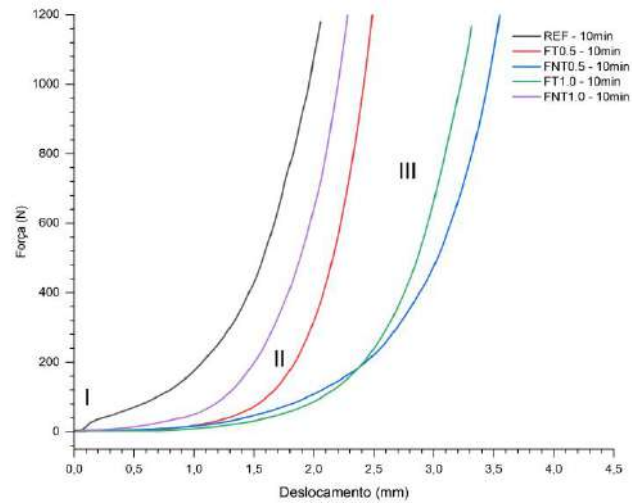
O acréscimo dos deslocamentos observados para as curvas das argamassas FNT 0,5% e FNT1,0%, ocorre devido a redução das cargas necessárias para deformação do material decorrentes de seu rompimento, pois o aumento da viscosidade da pasta e redução da sua capacidade plástica em manter a coesão, conforme Cardoso, Pileggi e John (2010).

Para a taxa de carregamento de 3,0 mm/s, foram obtidos os resultados constantes na

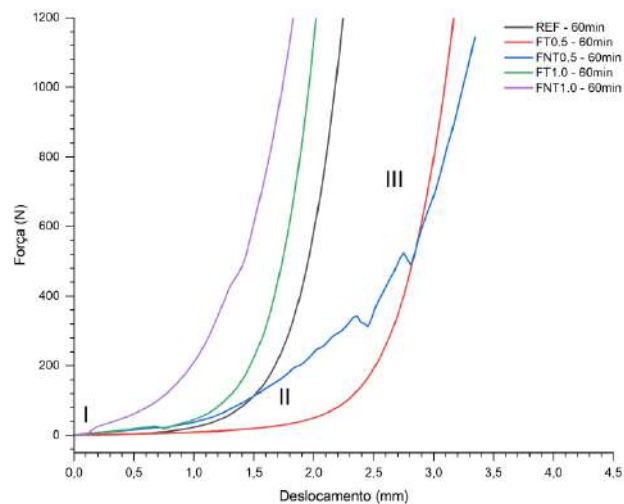
Figura 34. Nesse caso, a tendência observada foi oposta a observada para a taxa de carregamento de 0,1 mm/s, havendo um acréscimo nas cargas necessárias para o deslocamento nos momentos iniciais, os resultados corroboram com os obtidos por Cardoso, Pileggi e John (2005).

Comparando a evolução dos resultados para as idades de 10 min e 60 min, observa-se é possível comparar a influência da adição do teor de fibras analisando o comportamento das argamassas de referência e de com 0,5% de fibra tratada, que aos 10 min após o preparo da mistura apresentaram curvas muito semelhantes, no entanto, o efeito da consolidação da argamassa aos 60 min foi mais acentuado para a argamassa de referência. Analisando os resultados dos quatros gráficos obtidos comprova-se a suscetibilidade do comportamento do material à adição das fibras e ao tratamento aplicado.

**Figura 34** - Squeeze Flow para taxa de carregamento igual a 3,0mm/s (a) após 10 min da mistura e (b) após 60min da mistura



(a)



(b)

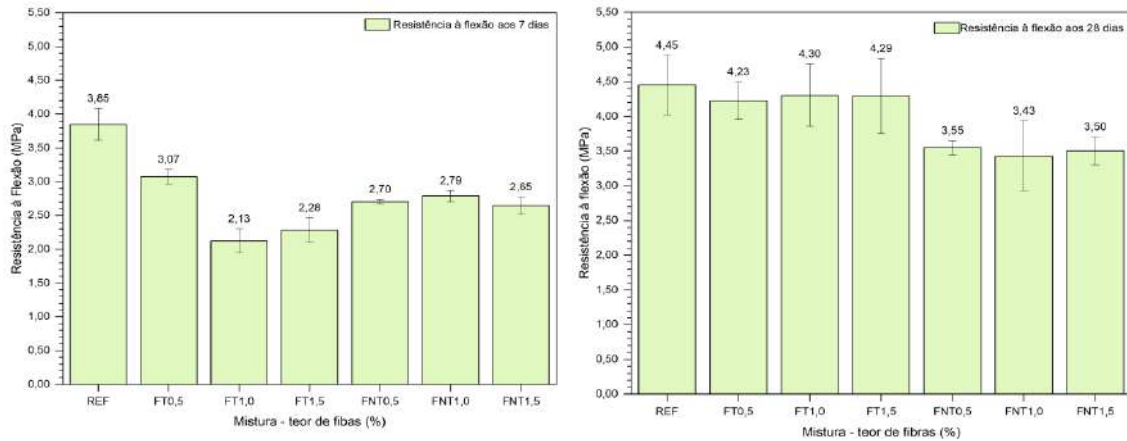
## 5.2.3 Ensaios no Estado Endurecido

### 5.2.3.1 Resistência à tração na flexão e compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão aos 7 e 28 dias estão representados no gráfico da Figura 35 e Figura 36, respectivamente. Os gráficos apresentam a média e barras de erros com o desvio padrão encontrado para cada mistura.

Para a resistência a flexão houve acréscimo das resistências para todas as misturas. Verificou-se também que a ganho de resistência foi maior para as fibras tratadas evidenciando a eficiência do tratamento aplicado na ancoragem à matriz.

**Figura 35** - Resistência à flexão aos 7 e 28 dias



Os testes de análise de variância ANOVA realizados indicaram que para um nível de significância de 5% houve diferença entre as médias das resistências apresentada pelas misturas tanto para os ensaios realizados aos 7 dias com para os ensaios realizados aos 28 dias.

O teste de Tukey foi realizado para realizar a comparação entre as médias obtidas para cada mistura, dois a dois, os resultados mostrados na Tabela 13 através de agrupamento de letras, as médias que não são significativamente diferentes compartilham a mesma letra.

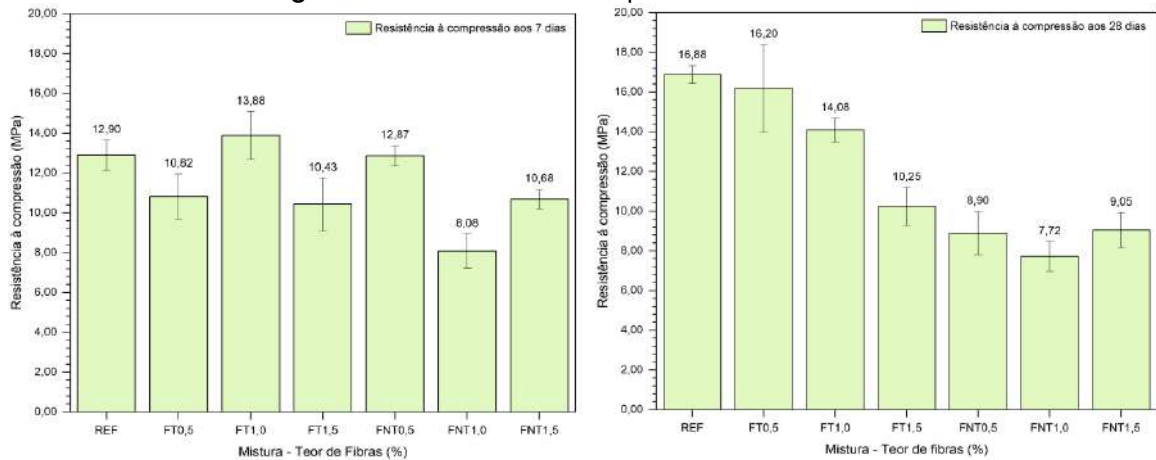
**Tabela 13** - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à flexão das misturas aos 7 e 28 dias

MISTURA	RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 7 DIAS		RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 28 DIAS	
	Média	Grupos	Média	Grupos
REF	3,84	A	4,45	E
FT0,5	3,07	B	4,23	E
FT1,0	2,13		4,30	E
FT1,5	2,28	C	4,29	E
FNT0,5	2,70	B C	3,55	E
FNT1,0	2,79	B	3,43	E
FNT1,5	2,65	B C	3,5	E

Para a resistência à compressão, conforme Figura 36, houve redução na resistência á compressão aos 28 dias das misturas com argamassas não tratadas, o que pode ser indicativo de algum mecanismo de degradação das fibras, conforme também foi observado por De Aquino *et. al* (2023). As argamassas produzidas com

fibras tratadas apresentaram comportamento diferente, nesse caso houve acréscimo da resistência.

**Figura 36 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias**



Os resultados dos ensaios de resistência à compressão também foram tratados por análise estatística, a análise de variância ANOVA indicou que para um nível de significância de 5% houve diferença entre as médias da resistência à compressão apresentada pelas misturas tanto para os ensaios realizados aos 7 dias com para os ensaios realizados aos 28 dias.

O teste de Tukey foi realizado para comparar os as médias obtidas para as argamassas variando o teor de fibras e aplicação do tratamento, dois a dois, os resultados mostrados na

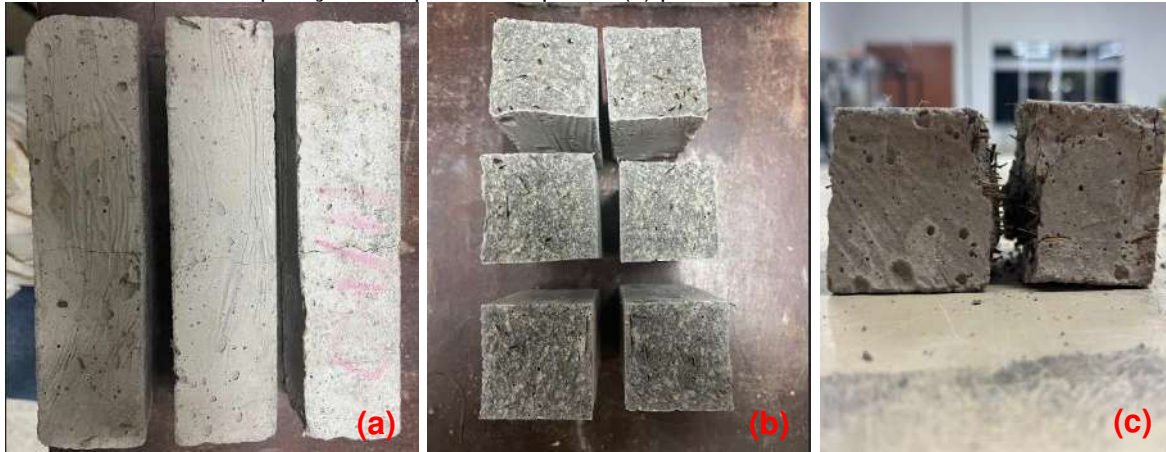
Tabela 14 através de agrupamento de letras, as médias que não são significativamente diferentes compartilham a mesma letra.

**Tabela 14 - Teste de Tukey realizado para comparação das médias de resistência à compressão das misturas aos 7 e 28 dias**

MISTURA	RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 7 DIAS		RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 28 DIAS		
	Média	Grupos	Média	Grupos	
REF	12,9	A	16,9	E	
FT0,5	10,8	A	16,2	E	
FT1,0	13,9	A	14,1	E	F
FT1,5	10,5	A	10,2	F	
FNT0,5	12,8	A	8,9	G	
FNT1,0	8,1	B	7,7	G	
FNT1,5	10,7	A	9,0	G	

No ensaio de flexão foi possível observar que após o rompimento da matriz os corpos de prova mantiveram sua integridade, conforme Figura 37, evidenciando que para as cargas utilizadas no ensaio houve a ruptura da matriz, porém foi mantida a adesão da fibra.

**Figura 37** - Aspecto dos corpos de prova com 1,0% de fibra não tratada (a) após a ruptura (b) após separação das partes rompida e (c) perfil da fratura à flexão



Comparando os resultados obtidos com outros estudos, Eduardo, Nóbrega e Ferreira (2023) verificaram as propriedades mecânicas de resistência à flexão e à compressão de argamassas produzidas com fibras de carnaúba sem tratamento, analisando a influência da variação do teor (3,0% e 5,0%) e comprimento das fibras (20mm, 40mm e 60mm). Os autores observaram que os maiores valores de resistência encontrados foram para as misturas menores teores de fibras com menores comprimentos, conforme também foi observado no presente estudo.

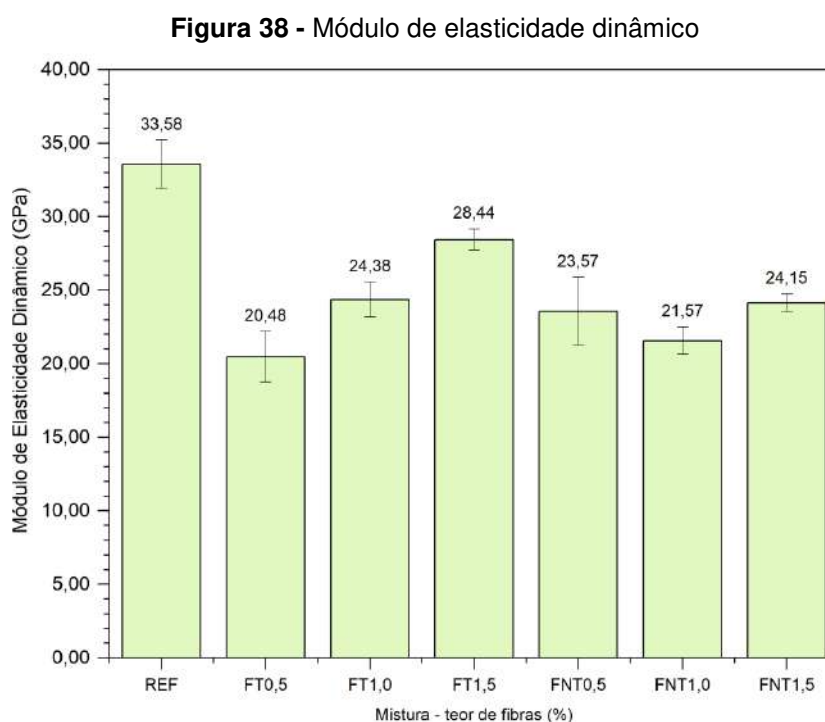
Em argamassas, o volume excessivo de fibras adicionado pode ser prejudicial a resistência mecânica do compósito, conforme Marvila *et. al* (2021) observou que há uma queda na resistência das argamassas com adição de teores de fibras acima de 3,0%, segundo os autores teores elevados de fibra comprometem a molhabilidade do sistema. Awoyera *et. al* (2022) também verificaram que o maior volume de fibras pode induzir a sobreposição do material criando caminhos de falha no compósito cimentício afetando o desempenho mecânico do material sob carga de teste.

O estudo de Santo de Lima *et. al* (2024), que avaliou a influência da adição de fibras de guarumã em argamassas, utilizando o traço e teores de fibra adicionados iguais aos avaliados nessa pesquisa, obteve resultados semelhantes para resistência à compressão e a flexão aos obtidos no presente estudo.

### 5.2.3.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado à capacidade das argamassas absorverem deformações, módulos de elasticidade menores indicam que a argamassa será mais capaz de sem deformar sem sofrer ruptura, conforme explicam Morelo e Vieira (2024), quanto menor for o módulo de elasticidade, maior será a capacidade do compósito de absorver deformações.

A Figura 38 apresenta os valores de módulo de elasticidade determinados para as misturas analisadas. Observa-se que a adição de fibras contribuiu para a redução do módulo de elasticidade, durante o ensaio isso pode ser observado pela redução da velocidade do pulso ultrassônico em argamassa com adição de fibras, resultado semelhante ao encontrado por Mathavan, Sakthieswaran e Babu (2021), também contribuiu para o resultado os menores valores de densidade aparente das argamassas com adição de fibras.



Os resultados do ensaio foram tratados por análise estatística, a análise de variância ANOVA indicou que para um nível de significância de 5% houve diferença entre as médias do módulo de elasticidade dinâmico apresentado pelas misturas. O teste de Tukey comparou as médias obtidas, verificando que todas as misturas com

adição de fibras apresentaram desempenho superior ao encontrado para a argamassa de referência (apresentaram menores valores para o módulo de elasticidade), sendo consideradas equivalentes a misturas: FT0,5%; FT1,0%; FT1,5%, FNT0,5% e FNT1,0, seguidas pela argamassa FNT1,5 e com o pior desempenho a argamassa de referência.

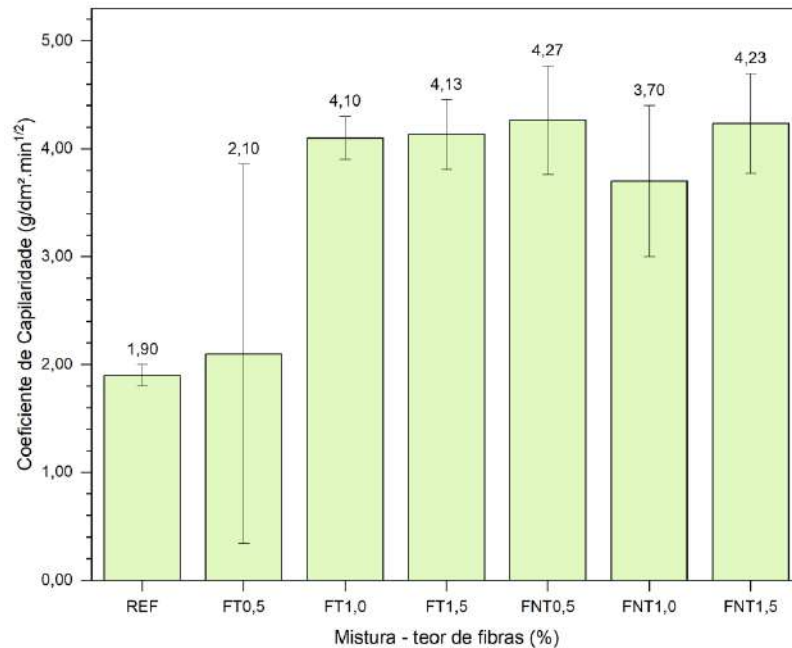
### 5.2.3.3 Absorção por Capilaridade, absorção por Imersão e índice de vazios

As argamassas são um material de característica porosa, conforme imagem da Figura 39 obtida através de microscópio digital com aumento de 400x. Essa característica porosa as torna mais suscetíveis aos fenômenos de capilaridade e absorção de água.

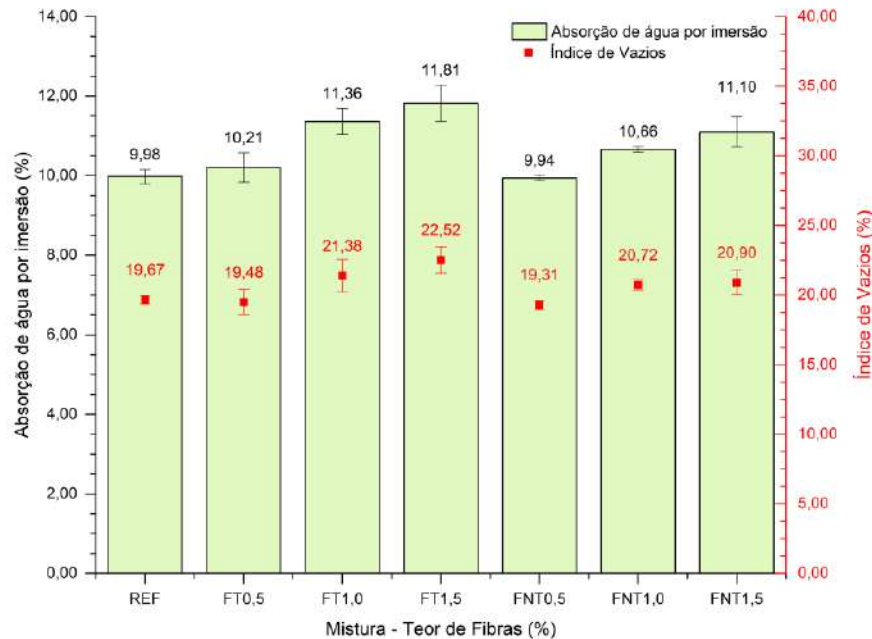
**Figura 39** - Aspecto poroso da argamassa



Santo de Lima (2024) definem a absorção capilar como uma propriedade ligada à intercomunicação dos poros internos que pode causar um fluxo capilar de água ou outros elementos. O gráfico da Figura 40 apresenta os resultados para o coeficiente de absorção por capilaridade obtido para as argamassas neste trabalho, observa-se um acréscimo para as taxas de absorção por capilaridade acompanhado para o acréscimo do teor de fibras.

**Figura 40 - Coeficiente de Absorção por capilaridade**

Os resultados obtidos para a absorção de água por imersão e índice de - desses parâmetros relacionados à adição das fibras, sendo os maiores valores encontrados par adição de 1,5% da fibra em volume, observou-se também que a acréscimo foi maior para as fibras não tratadas, isso pode ser explicado pelo mecanismo de aderência entre a fibra tratada e a argamassa ter ocorrido de forma mais efetiva reduzindo a presença de vazios na interface entre os materiais contribuindo para a formação de um compósito melhor adensado.

**Figura 41** - Absorção por imersão e índice de vazios

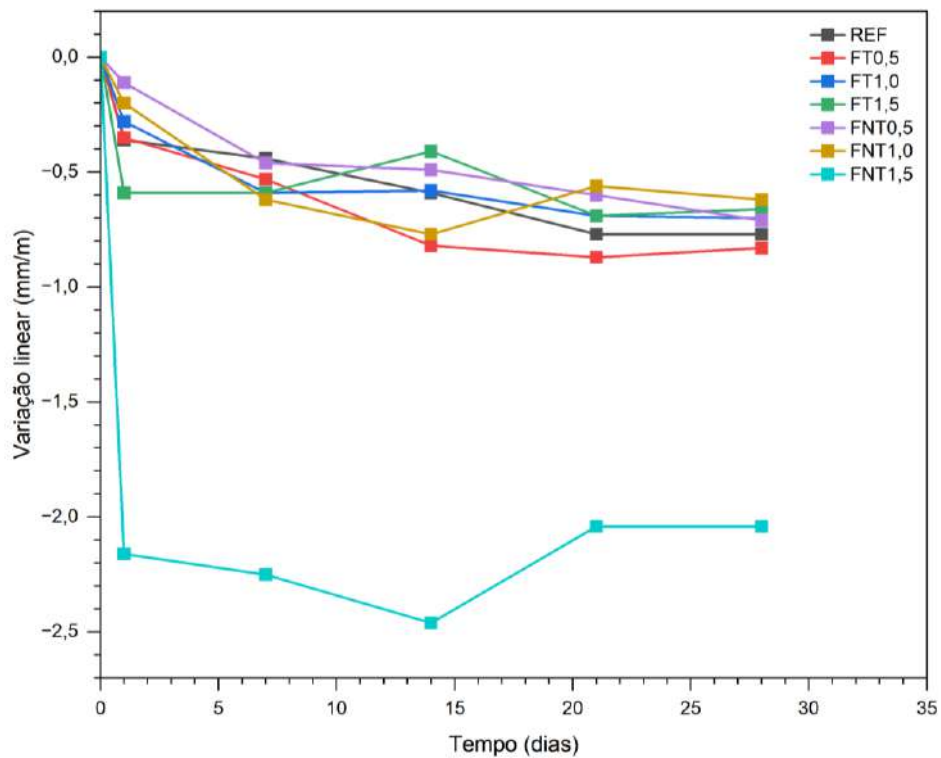
Comparado a outros estudos os resultados foram melhores que os verificados por De Aquino *et. al* (2023) para argamassa reforçadas com fibra da palha do milho e aos obtidos por Santo de Lima *et. al* (2024) para as fibras de guarumã.

#### 5.2.3.4 Variação Dimensional (retração ou expansão linear)

Os resultados do ensaio de variação diametral indicaram que todas as misturas analisadas apresentaram o fenômeno da retração, conforme observado na Figura 42.

A análise do gráfico permite observar que todas as argamassas com exceção da FNT1,5 apresentaram valores inferiores 0,8mm/m aos recomendados pela NBR 13281 (2023) para argamassas de revestimento.

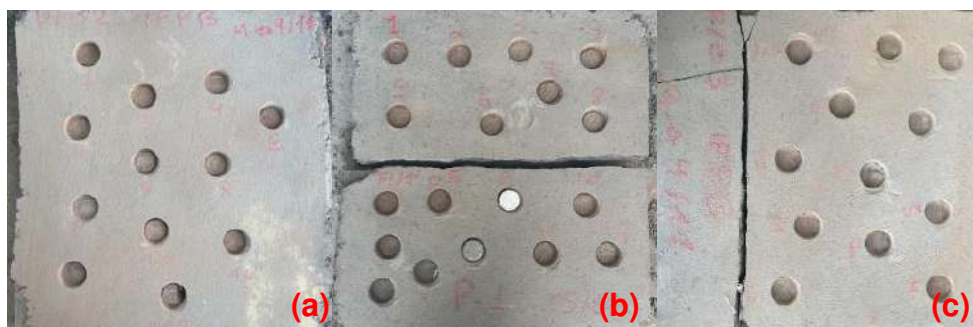
Realizando uma comparação entre as misturas com adição de fibras observa-se que os corpos de prova com menor retração foram produzidos com fibra não tratada.

**Figura 42 - Variação dimensional das argamassas**

### 5.2.3.5 Resistência de aderência à tração

O ensaio foi realizado para as misturas REF%, FT0,5% e FNT0,5%, que para o fator de a/c adotado para as apresentaram as condições de trabalhabilidade desejáveis. As imagens apresentam os padrões de rompimento observados durante a realização do ensaio. a

A Figura 43, mostra os painéis produzidos onde foram realizados a o ensaios de resistência aderência ao substrato.

**Figura 43 – Painéis revestidos com argamassa (a) referência (b) FNT0,5% (c) FT0,5%**

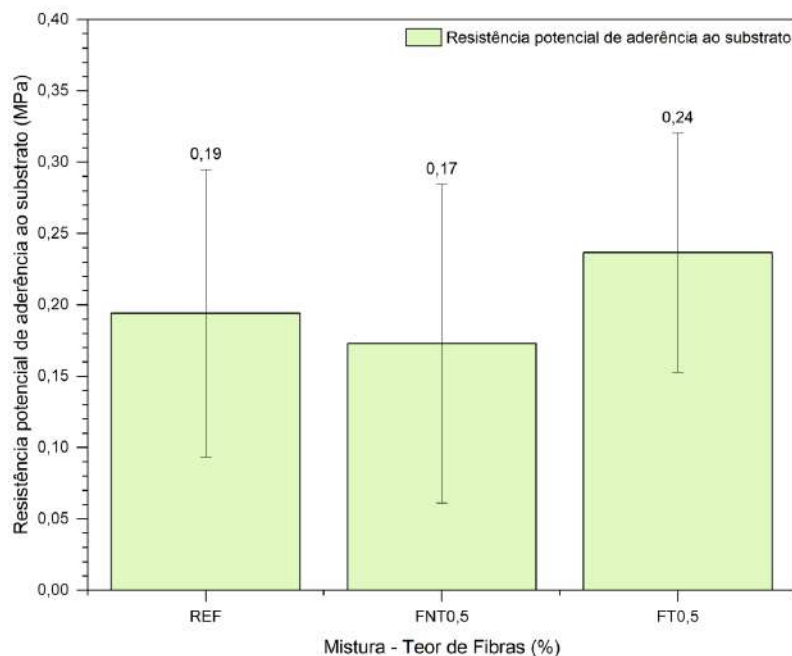
A Tabela 15 apresenta os resultados da inspeção visual realizada após a realização do ensaio para verificação da forma de ruptura observada e a respectiva frequência, também está registrada a resistência calculada para cada argamassa testada.

**Tabela 15 - Resistência de aderência à tração e formas de ruptura**

REVESTIMENTO	RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA	FORMA DE RUPTURA						
		Substrato	Substrato chapisco	Chapisco	Chapisco/argamassa	argamassa	argamassa/cola	cola/pastilha
FNT0,5%	0,17±0,11%	-	8,3%	16,7%	-	66,7%	-	8,3%
REF	0,19±0,10%	-	33,3%	16,7%	-	50,0%	-	-
FT0,5%	>0,24±0,08%	-	0,7%	0,3%	-	-	-	-

Os resultados da média e desvio padrão obtido para cada argamassa estão apresentados no gráfico da Figura 44.

**Figura 44 - Resultados do Ensaio de Aderência ao substrato**



Com base nos resultados obtidos verificou-se que a mistura com melhor resistência de aderência a tração foi a argamassa reforçada com fibras tratadas – FT0,5, apresentando resultados superiores a mistura de referência e a argamassa com fibras não tratadas, que apresentou o pior desempenho. A inspeção visual realizada para análise da forma de ruptura verificada para cada corpo de prova

reforça essa constatação, pois para as a mistura com fibras não tratadas predominou o rompimento no interior da argamassa, que com base em outros resultados da pesquisa e pela presença da cera existente naturalmente na superfície da fibra contribuem para o enfraquecimento da sua adesão com a matriz. Em contrapartida para as fibras com tratamento predominou a ruptura na interface do chapisco (realizado sem adição de fibras), para nenhum dos corpos de prova houve ruptura no interior da argamassa, o que evidencia que a resistência à aderência calculada corresponde à tensão de ruptura do chapisco, e a resistência da argamassa superior. Quanto à sua classificação e adequação às exigências normativas o valor encontrado para a mistura FT0,5 (argamassa com adição de fibra tratada no teor de 0,5%) está no intervalo entre 0,2 MPa e 0,3 MPa, exigido pela NBR 13281 (ABNT, 2023) para aplicação em revestimentos internos e externos respectivamente.

## 6 CONCLUSÕES

Os ensaios e análises realizados no decorrer deste trabalho possibilitaram realizar a caracterização das fibras de carnaúba nos aspectos físicos, químico e mecânico e caracterizar as argamassas produzidas com as fibras nas condições natural (sem tratamento) e tratada (tratamento alcalino com  $\text{CaOH}_2$ ), contribuindo para as pesquisas sobre aplicação de fibras naturais em matérias cimentícios e sobre o aproveitamento das fibras de carnaúba como material de engenharia.

Quanto às fibras de carnaúba, foi verificada a afetividade do tratamento alcalino com  $\text{CaOH}_2$  na promoção de alterações na estrutura da fibra verificados pelo acréscimo do índice de cristalinidade, alteração no comportamento térmico da fibra que evidenciou a redução dos teores de hemicelulose e lignina, modificação da resistência à degradação térmica, também verificou-se alterações nas propriedades mecânicas com redução da resistência à tração e alongamento máximo da fibra.

Na avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco, a adição de fibras reduziu a trabalhabilidade e favoreceu a coesão das misturas.

Com relação às propriedades no estado endurecido, para a resistência à flexão e à compressão todos os resultados apresentaram valores acima do recomendado pela norma brasileira específica para argamassas de revestimento. A

adição das fibras contribuiu para redução do módulo de elasticidade reduzindo a rigidez quando comparada à argamassa de referência, indicando que as fibras atuam melhorando a capacidade de compósito absorver as deformações sem sofrer ruptura.

Quanto à avaliação da resistência à aderência superficial, a argamassa FT0,5% apresentou melhores resultados que a argamassa com fibras não tratadas no mesmo teor e que a argamassa de referência, sem adição de fibras, ressaltando a eficácia do tratamento aplicado as fibras.

Considerando os resultados obtidos a respeito das propriedades das fibras e das argamassas, constata-se a possibilidade de aplicação das fibras de carnaúba como material de reforço para argamassas de revestimento e da aplicação do tratamento com  $\text{CaOH}_2$  que contribuiu para melhorar as propriedades de trabalhabilidade e aderência entre às fibras e a matriz cimentícia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, Jawad; ZHOU, Zhiguang. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: a review. **Construction and Building Materials**. v. 333, p. 127353, 2022.
- ALCIVAR-BASTIDAS, S.; PETROCHE, Daniel M.; MARTINEZ-ECHEVARRIA, M. J. The effect of different treatments on abaca fibers used in cementitious composites. **Journal of Natural Fibers**. v. 20, n. 1, p. 2177235, 2023.
- ALI, Babar et. al A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials. **Construction and Building Materials**. v. 351, p. 128957, 2022.
- ALSHAYA, N. et. al The use of plant-based natural fibers in reinforced cement composites. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. v. 12, n. 5, p. 557-565, 2018.
- ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1557 - Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers**. ASTM International, 2014.
- ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2654 - Standard Test Methods for Moisture in Textiles**. ASTM International, 2022.
- AWOYERA, Paul O. et. al Development of Fibre-Reinforced Cementitious Mortar with Mineral Wool and Coconut Fibre. **Materials**. v. 15, n. 13, p. 4520, 2022.
- AZEVEDO, Afonso et. al Rheology, hydration, and microstructure of portland cement pastes produced with ground açai fibers. **Applied Sciences**. v. 11, n. 7, p. 3036, 2021.
- AZEVEDO, Afonso RG et al. Guaruman fiber: A promising reinforcement for cement-based mortars. **Case Studies in Construction Materials**. v. 16, p. e01029, 2022.
- BIZERRA, Deiby et. al Carnauba Straw as Feedstock for Solid Biofuel Production. **Advances in Environmental and Engineering Research**. v. 4, n. 3, p. 1-13, 2023.
- CAO, Mingli; XU, Ling; ZHANG, Cong. Rheological and mechanical properties of hybrid fiber reinforced cement mortar. **Construction and Building Materials**. v. 171, p. 736-742, 2018.
- CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow**. ANAIS, Florianópolis, VI SBTA, p. 121-143, 2005.
- CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, v. 1, p. 1-29, 2010.
- DA SILVA, Francinaldo Leite et. al Evaluation of blend production of cellulases and xylanases Using pretreated and recycled carnauba straw. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. p. 1-13, 2022.
- DA SILVA, Francinaldo Leite et. al Pretreatments of Carnauba (*Copernicia prunifera*) straw residue for production of cellulolytic enzymes by *Trichoderma reesei* CCT-2768 by solid state fermentation. **Renewable Energy**. v. 116, p. 299-308, 2018.
- DA SILVA, Francinaldo Leite et. al Valorization of an agroextractive residue—Carnauba straw—for the production of bioethanol by simultaneous saccharification and fermentation (SSF). **Renewable Energy**. v. 127, p. 661-669, 2018.
- DA SILVA, Tulane Rodrigues et al. A review on the performance of açai fiber in cementitious composites: Characteristics and application challenges. **Journal of Building Engineering**. v. 71, p. 106481, 2023.

- DA SILVEIRA, Pedro Henrique Poubel Mendonça *et. al.* Amazon Natural Fibers for Application in Engineering Composites and Sustainable Actions: A Review. *Eng.* v. 5, n. 1, p. 133-179, 2024.
- DE ALMEILDA, José Afonso Santana *et. al.* Use, perception, and local management of Copernicia prunifera (Miller) HE Moore in rural communities in the Brazilian Savanna. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine.** v. 17, p. 1-13, 2021.
- DE AQUINO, Luiz Arthur Silva *et. al.* Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime. **Construction and Building Materials.** v. 353, p. 129111, 2022.
- DE AZEVEDO, Afonso RG *et. al.* Investigation of the Potential Use of Curauá Fiber for Reinforcing Mortars. **Fibers.** v. 8, n. 11, 2020.
- DE AZEVEDO, Afonso RG *et. al.* Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. **Journal of Building Engineering.** v. 33, p. 101675, 2021.
- DE OLIVEIRA LIBÓRIO DOURADO, João Batista *et al.* Babassu Fibers as Green Mortar Additives. *Journal of Natural Fibers*, v. 20, n. 2, p. 2256471, 2023.
- DE PELLEGRIN, M. Z.; ACORDI, J.; MONTEDO, O. R. K. Influence of the length and the content of cellulose fibers obtained from sugarcane bagasse on the mechanical properties of fiber-reinforced mortar composites. **Journal of Natural Fibers.** 2019.
- EDUARDO, Antunes França; NÓBREGA, Marcilene Vieira de; FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva. Evaluation of the behavior of mortars produced with fibers from the straw of carnauba: effects of the content of addition and length used. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.
- FERNANDES, Jéssica Emanuela *et. al.* Carnauba straw: Characterization and chemical treatments. **Journal of Applied Polymer Science.** v. 122, n. 3, p. 1614-1621, 2011.
- FERREIRA, Saulo Rocha *et. al.* Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials.** v. 101, p. 730-740, 2015.
- FORNARI JR, C. C. M. Fibras vegetais para compósitos poliméricos. **Ilhéus: Editus,** 2017.
- GUIMARÃES, Pompeu Paes *et. al.* Produtos florestais não madeireiros do nordeste brasileiro: carnaúba. **Nativa.** v. 6, n. 2, p. 213-218, 2018.
- JUNIO, Raí Felipe Pereira *et. al.* Carnauba leaf fibers: correlation among diametrical variation, physical and mechanical properties. **Journal of Materials Research and Technology.** v. 22, p. 1888-1899, 2023.
- JUNIO, Raí Felipe Pereira *et. al.* Copernicia prunifera leaf fiber: A promising new reinforcement for epoxy composites. **Polymers.** v. 12, n. 9, p. 2090, 2020.
- JUNIO, Rai Felipe Pereira *et. al.* Thermochemical and structural characterization of promising carnauba novel leaf fiber (Copernicia prunifera). **Journal of Materials Research and Technology.** v. 18, p. 4714-4723, 2022.
- KHAN, Mehran; REEHMAN, Abdul; ALI, Majid. Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road. **Construction and Building Materials.** v. 244, p. 118382, 2020.
- KIM, Jun Tae; NETRAVALI, Anil N. Mercerization of sisal fibers: effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites. **Composites Part A: Applied science and manufacturing.** v. 41, n. 9, p. 1245-1252, 2010.
- LIMA, Rafael Nogueira *et. al.* Investigation of the potential of the carnauba stalk and of the carnauba's straw to use as biofuel. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, 2019.

- MARVILA, Markssuel Teixeira *et. al* Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. **Innovative Infrastructure Solutions**. v. 6, p. 1-24, 2021.
- MATHAVAN, M.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, O. Ganesh. Experimental investigation on strength and properties of natural fibre reinforced cement mortar. **Materials Today: Proceedings**. v. 37, p. 1066-1070, 2021.
- MELO, José Daniel Diniz *et. al* A biodegradable composite material based on polyhydroxybutyrate (PHB) and carnauba fibers. **Composites Part B: Engineering**. v. 43, n. 7, p. 2827-2835, 2012.
- MORELO, Luciana Paula Tessaro; VIEIRA, Geilma Lima. Análises mecânicas e de durabilidade em argamassas produzidas com baixo teor de cimento. **Ambiente Construído**, v. 24, p. e130856, 2024.
- NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2016
- NBR 13277. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 13280. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.
- NBR 13281-1. **Requisitos e métodos de ensaios – Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2023.
- NBR 13281-2. **Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenarias**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2023.
- NBR 15259. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 15261. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- NBR 15630. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2008.

- NBR 15839. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – caracterização reológica pelo método squeeze-flow**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2010.
- NBR 16605. **Determinação da massa específica do cimento**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2017.
- NBR 16916. **Agregado Miúdo - Densidade e Absorção**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2017.
- NBR 16972. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.
- NBR 17054. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.
- NBR 7211. **Agregados para concreto – Requisitos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.
- NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.
- PEREIRA, lully da Silva Amaral *et. al* Evaluation of the potential of treatments by NaOH and tannic acid of pineapple leaf (*Ananas comosus*) fiber used as reinforcement in coating mortars. **Journal of Building Engineering**. v. 95, p. 110234, 2024.
- PEREIRA, Jéssyca ES *et. al* Valorization of carnauba straw and cashew leaf as bioadsorbents to remove copper (II) ions from aqueous solution. **Environmental Technology & Innovation**. v. 23, p. 101706, 2021.
- PNUD. 2012. **Carnaúba Viva**, Brazil. Equator Initiative Case Study Series. New York, NY
- PRIYADHARSHINI, S.; RAMAKRISHNA, G. A novel approach for the rheological behaviour of polymer modified untreated and treated sisal fibre reinforced cement mortar composites. **Materials Today: Proceedings**. v. 5, n. 5, p. 12927-12939, 2018.
- QUEIROGA, V. P. ; ASSUNCAO, M. V. ; ALMEIDA, F. A. C. ; ALBUQUERQUE, E. M. B. . **Carnaubeira: Tecnologias de Plantio e Aproveitamento Industrial**. 2. ed. Campina Grande: ASSOCIAÇÃO DA REVISTA ELETRÔNICA A BARRIGUDA - AREPB- Revista Barriguda, 2017. v. 1. 260p .
- RAHMAN, M. Mizanur; KHAN, Mubarak A. Surface treatment of coir (*Cocos nucifera*) fibers and its influence on the fibers physico-mechanical properties. **Composites science and technology**. v. 67, n. 11-12, p. 2369-2376, 2007.
- SANTO DE LIMA, Thuany Espirito *et. al* Potentiality of using guarumã natural fiber (*Ischinosiphon koern*) in sustainable coating mortars. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 30, p. 1301-1309, 2024.
- SEGAL, LGJMA *et. al* An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile research jornal**. v. 29, n. 10, p. 786-794, 1959.
- SURNAM, B. Y. R.; IMRITH, G. Investigation on the mechanical properties of coconut leaf stalk fibres reinforced composites. **Journal of Natural Fibers**. v. 20, n. 2, p. 2198276, 2023.
- THANUSHAN, Kirupairaja; SATHIPARAN, Navaratnarajah. Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks. **Materialia**. v. 21, p. 101309, 2022.


VAISHNAVI, M. *et. al* Strength and workability characteristics of coir and nylon fiber reinforced self-compacting mortar. **Materials Today: Proceedings**. v. 46, p. 4696-4701, 2021.

VIEIRA, S. **Análise de Variância (ANOVA)**. São Paulo: Editora Atlas, 2006.

VIVEK, Subramanian Shanmugapuram; PRABALINI, Chandrasekaran. Experimental and microstructure study on coconut fibre reinforced self compacting concrete (CFRSCC). **Asian Journal of Civil Engineering**. v. 22, p. 111-123, 2021.

WANI, Tawfeeq Ahmad; GANESH, S. Study on fresh properties, mechanical properties and microstructure behavior of fiber reinforced self compacting concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**. 2022.

ZHAO, Chenggong *et. al* Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview. **Construction and Building Materials**. v. 365, p. 130075, 2023.

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
	R. Tranquílino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### Dissertação de Mestrado

<b>Assunto:</b>	Dissertação de Mestrado
<b>Assinado por:</b>	Itamira Virginio
<b>Tipo do Documento:</b>	Dissertação
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Itamira Raquel Santos Virginio, ENGENHEIRO-AREA, em 09/04/2026 21:16:01.

Este documento foi armazenado no SUAP em 09/04/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1830793

Código de Autenticação: 526b78c07f

