



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Emanuel Vitor Ribeiro Alves

Impacto da adição de cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* em propriedades física
e mecânica de PRFV

CARAÚBAS

2024

Emanuel Vitor Ribeiro Alves

Impacto da adição de cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* em propriedades física e mecânica de PRFV

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Claudia de Melo Caldas Batista.

CARAÚBAS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

AA474 Alves, Emanuel Vitor Ribeiro.
i Impacto da adição de cinzas de Pistia
 stratiotes e Eichhornia crassipes em propriedades
 física e mecânica de PRFV / Emanuel Vitor Ribeiro
 Alves. - 2024.
 81 f. : il.

 Orientadora: Ana Claudia de Melo Caldas
 Batista.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2024.

 1. fitorremediação. 2. compósitos poliméricos.
 3. macrófitas aquáticas. 4. sustentabilidade. 5.
 PRFV. I. Batista, Ana Claudia de Melo Caldas,
 orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Emanuel Vitor Ribeiro Alves

Impacto da adição de cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* em propriedades física e mecânica de PRFV

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 18 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS BATISTA**
Data: 01/11/2024 09:30:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Ana Claudia de Melo Caldas Batista (UFERSA)
Presidente

**DIEGO DAVID
SILVA DINIZ:** Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA
DINIZ: [REDACTED]
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ:
[REDACTED] OU=UFERSA - Universidade
Federal Rural Do Semi-Arido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2024.11.01 09:04:08-03'00"
Foxit PhantomPDF Versão: 10.1.5

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **WENDELL ALBANO**
Data: 01/11/2024 08:33:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wendell Albano (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

*Dedico esse momento a Deus, minha família
e a todos que se fizeram presentes nessa
jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sempre me abençoar e me conceder a força necessária para superar cada obstáculo. Nada seria possível sem Suas bênçãos, e é com profunda gratidão que reconheço Sua presença constante em cada passo desta jornada.

Manifesto também minha sincera gratidão à minha família, especialmente à minha mãe Ágda, meu pai Erivan e minha irmã Maria Emanuely. Sem o esforço, dedicação e apoio incondicional de vocês, eu não teria chegado até aqui. Amo profundamente cada um de vocês e reconheço que essa conquista é, em grande parte, fruto do amor e dos sacrifícios que vocês fizeram por mim.

À minha namorada e futura noiva, Maria Helena, agradeço imensamente por ter caminhado ao meu lado desde o início desta jornada. Enfrentamos juntos cada desafio, e seu apoio constante foi fundamental para que eu seguisse em frente. Esta vitória também é sua, e eu sou muito grato por tudo. Saiba que eu a amo profundamente.

Não posso deixar de agradecer às minhas amigas, irmãs de coração e companheiras de apartamento, Clara e Nathielly. Vocês estiveram comigo desde o começo, e o incentivo e a parceria de vocês foram essenciais nos momentos difíceis e também nos momentos de alegria e diversão. Sou grato por todas as risadas, pelas brincadeiras e pela amizade que cultivamos ao longo desse tempo.

Aos amigos que tive o privilégio de conhecer durante a universidade, em especial Marina, Marcus Paulo, George e tantos outros, agradeço pelo companheirismo e pelas experiências compartilhadas. Vocês têm um espaço especial no meu coração, e desejo imensamente o sucesso de cada um de vocês. Admiro muito todos e fico na torcida por suas conquistas.

Agradeço ainda à família Caraubaja, da qual tive o prazer de fazer parte por mais de um ano. Vocês me proporcionaram experiências que jamais imaginei vivenciar, e cada momento foi significativo. GO CARAUBAJA!

À minha orientadora, Ana Claudia, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade de ser bolsista em seu projeto e por todo o apoio ao longo do curso. Tenho um carinho enorme por você e a admiro muito, tanto como profissional quanto como pessoa. Obrigado por acreditar no meu potencial.

Por fim, deixo meu agradecimento a todos os professores que me acompanharam nesta trajetória acadêmica. Cada um de vocês contribuiu para o meu crescimento, transmitindo

valiosos conhecimentos que me prepararam para o futuro profissional. Sou grato por todo o aprendizado.

MUITO OBRIGADO A TODOS!

ÉPIGRAFE

“Somos o que fazemos para mudar o que fomos, mas se nada somos, virão apenas velhos outonos.”

Guilherme de Sá

RESUMO

A demanda por produtos sustentáveis impulsiona o desenvolvimento de compósitos como alternativa para reduzir impactos ambientais, com isso a utilização de materiais reciclados e subprodutos industriais agrega valor aos resíduos que seriam descartados. Os Compósitos, formados por dois ou mais componentes, pode proporcionar propriedades específicas úteis para diversas aplicações e paralelamente as macrófitas aquáticas, como *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*, são eficazes na fitorremediação, removendo poluentes de forma sustentável. No entanto, quando não são removidas, geram acúmulo de biomassa e poluição. Reaproveitar essa biomassa em compósitos é uma solução promissora, transformando um problema ambiental em materiais ecológicos inovadores. Este estudo propõe desenvolver um material compósito utilizando resina poliéster, fibra de vidro e cinzas de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*. O objetivo é mitigar a poluição ambiental ao incorporar essas macrófitas no compósito, evitando que os poluentes retornem ao ecossistema. Diante disso, o trabalho analisou a influência das cinzas de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes* nas propriedades mecânicas de compósitos híbridos reforçados com fibra de vidro, utilizando ensaios de tração uniaxial e densidade volumétrica. Dez placas de compósitos foram produzidas com diferentes composições (0%, 1,0% e 1,5%), variando os percentuais de cinzas das macrófitas. Os ensaios de densidade volumétrica e tração uniaxial mostraram que o PRFV puro apresentou boa consistência e valores coerentes com a literatura. A adição de *Pistia stratiotes* resultou em melhorias discretas na resistência mecânica, enquanto a *Eichhornia crassipes* teve um impacto mais significativo, aumentando a rigidez do material. Ambas as macrófitas, mesmo em diferentes proporções, não comprometeram as propriedades do compósito.

Palavras-chave: fitorremediação; compósitos poliméricos; macrófitas aquáticas; sustentabilidade; PRFV.

ABSTRACT

The demand for sustainable products is driving the development of composites as an alternative to reduce environmental impacts, and the use of recycled materials and industrial by-products adds value to waste that would otherwise be discarded. The composites, made up of two or more components, can provide specific properties useful for various applications and in parallel aquatic macrophytes, such as *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*, are effective in phytoremediation, removing pollutants in a sustainable way. However, when they are not removed, they generate an accumulation of biomass and pollution. Reusing this biomass in composites is a promising solution, transforming an environmental problem into innovative ecological materials. This study proposes developing a composite material using polyester resin, fiberglass and ash from *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*. The aim is to mitigate environmental pollution by incorporating these macrophytes into the composite, preventing pollutants from returning to the ecosystem. The study therefore analyzed the influence of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* ash on the mechanical properties of hybrid composites reinforced with fiberglass, using uniaxial tensile and bulk density tests. Ten composite plates were produced with different compositions (0%, 1.0% and 1.5%), varying the percentage of macrophyte ash. The volumetric density and uniaxial traction tests showed that the pure GFRP had good consistency and values consistent with the literature. The addition of *Pistia stratiotes* resulted in slight improvements in mechanical strength, while *Eichhornia crassipes* had a more significant impact, increasing the material's rigidity. Both macrophytes, even in different proportions, did not compromise the properties of the composite.

Keywords: phytoremediation; polymer composites; aquatic macrophytes; sustainability; GFRP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Macrófita aquática da espécie <i>Pistia stratiotes</i>	22
Figura 2 - Macrófita aquática da espécie <i>Eichhornia crassipes</i>	23
Figura 3 - Principais arranjos de compósitos híbridos: Interlaminares: contínua (a), descontínua com disposição randômica (b), descontínua com alinhamento (c); Intralaminas ou Intrafeixes: contínua (d), fibras descontínuas com alinhamento específico (e); Entremeados ou Misturados: contínuas (f), descontínuas com disposição aleatória (g), descontínuas com alinhamento definido (h).	26
Figura 4 - Tipos de fraturas nos corpos de prova.	29
Figura 5 - Resina poliéster e catalisador utilizados.	31
Figura 6 - Manta de fibra de vidro.	32
Figura 7 - Cinzas de <i>Pistia stratiotes</i> e <i>Eichhornia crassipes</i>	32
Figura 8 - Fluxograma com as etapas para obtenção das cinzas de <i>Pistia stratiotes</i> e <i>Eichhornia crassipes</i>	34
Figura 9 - Montagem e distribuição dos grampos no molde.	37
Figura 10 - Apresentação do processo de laminação Hand Lay-up.	38
Figura 11 - (A) Estufa utilizada na secagem dos CPs e (B) Dessecador utilizado para resfriar os CPs.	41
Figura 12 - (A) Pesagem dos corpos de prova e (B) Ensaio de densidade volumétrica.	41
Figura 13 - Máquina de ensaio universal EMIC utilizada no teste de tração.	42
Figura 14 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV.	46
Figura 15 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV.	48
Figura 16 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV após ensaio de tração.	49
Figura 17 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,0% PS.	50
Figura 18 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,0% PS.	52
Figura 19 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,0% PS após ensaio de tração.	52
Figura 20 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,5% PS.	54
Figura 21 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,5% PS.	56
Figura 22 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,5% PS após ensaio de tração.	56
Figura 23 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,0% EC.	58

Figura 24 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,0% EC.	60
Figura 25 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,0% EC após ensaio de tração.....	60
Figura 26 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,5% EC.	62
Figura 27 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,5% EC.	64
Figura 28 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,5% EC após ensaio de tração.....	64
Figura 29 - Análise da tensão máxima entre o PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS.	66
Figura 30 - Análise da deformação entre o PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS. .	66
Figura 31 - Análise do módulo de elasticidade entre o PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS.	67
Figura 32 - Análise da tensão máxima entre o PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC.....	69
Figura 33 - Análise da deformação entre o PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC. .	70
Figura 34 - Análise do módulo de elasticidade entre o PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem dos elementos presentes nas cinzas da <i>Pistia stratiotes</i>	35
Tabela 2 - Porcentagem dos elementos presentes nas cinzas da <i>Eichhornia crassipes</i>	35
Tabela 3 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm ³) para o PRFV.	45
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV.	47
Tabela 5 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm ³) para o PRFV +1,0% PS.	49
Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,0% PS.	51
Tabela 7 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm ³) para o PRFV +1,5% PS.	53
Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,5% PS.	55
Tabela 9 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm ³) para o PRFV +1,0% EC.	57
Tabela 10 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,0% EC.	59
Tabela 11 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm ³) para o PRFV +1,5% EC.	61
Tabela 12 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,5% EC.	63

QUADROS

Quadro 1 - Definição dos tipos de fraturas.	28
Quadro 2 - Nomenclatura e definição dos CPs para o ensaio de tração uniaxial.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PRFV - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro.;

PRFV + 1,0% PS - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,0% das Cinzas de *Pistia stratiotes*;

PRFV + 1,5% PS - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,5% das Cinzas de *Pistia stratiotes*;

PRFV + 1,0% EC - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,0 % das Cinzas de *Eichhornia crassipes*;

PRFV + 1,5% EC - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,5 % das Cinzas de *Eichhornia crassipes*;

PRFV P1 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro Placa 1;

PRFV P2 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro Placa 2;

PRFV + 1,0% PS P1 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,0% das Cinzas de *Pistia stratiotes* Placa 1;

PRFV + 1,0% PS P2 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,0% das Cinzas de *Pistia stratiotes* Placa 2;

PRFV + 1,5% PS P1 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,5% das Cinzas de *Pistia stratiotes* Placa 1;

PRFV + 1,5% PS P2 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,5% das Cinzas de *Pistia stratiotes* Placa 2;

PRFV + 1,0% EC P1 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,0 % das Cinzas de *Eichhornia crassipes* Placa 1;

PRFV + 1,0% EC P2 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,0 % das Cinzas de *Eichhornia crassipes* Placa 2;

PRFV + 1,5% EC P1 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,5 % das Cinzas de *Eichhornia crassipes* Placa 1;

PRFV + 1,5% EC P2 - Compósito de Resina Poliéster Reforçado com Fibras de Vidro com Adição de 1,5 % das Cinzas de *Eichhornia crassipes* Placa 2;

PS - *Pistia stratiotes*;

EC - *Eichhornia crassipes*;

ASTM - American Society for Testing and Materials;

CP's - Corpos de Prova;

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura;

HCl - Ácido Clorídrico;

DP - Desvio Padrão;

LISTA DE SÍMBOLOS

D - Densidade volumétrica do laminado;

a - Massa do corpo de prova seco;

b - Massa do corpo de prova junto com o afundador imerso na água;

η - Densidade da água a 23°C;

w - Peso do afundador parcialmente submerso na água;

σ - Tensão máxima de tração;

F - Força registrada pela máquina;

A - Área média da seção transversal do corpo de prova;

ε - Deformação;

ΔL - Deformação registrada pela máquina;

L_0 - Medida inicial do galgo;

E - 50% da tensão máxima de tração de cada corpo de prova;

τ - Variação da tensão;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 MACRÓFITAS AQUÁTICAS	21
3.1.1 <i>Pistia stratiotes</i>	22
3.1.2 <i>Eichhornia crassipes</i>	23
3.2 COMPÓSITOS.....	24
3.3 COMPÓSITOS HÍBRIDOS	25
3.4 PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV).....	26
3.5 ANÁLISE DE FRATURA	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	31
4.2 MÉTODOS	33
4.2.1 Processamento da <i>Pistia stratiotes</i> e <i>Eichhornia crassipes</i>.....	33
4.2.2 Fabricação do molde para confecção do material compósito.....	36
4.2.3 Fabricação do material compósito	37
4.2.4 Fabricação das placas com fibra de vidro e resina pura	39
4.2.5 Fabricação da placa com fibra de vidro e resina com adição das cinzas de <i>Pistia stratiotes</i>	39
4.2.6 Fabricação da placa com fibra de vidro e resina com adição das cinzas de <i>Eichhornia crassipes</i>	39
4.2.7 Confecção dos corpos de prova	40
4.2.8 Ensaio de densidade volumétrica	40
4.2.9 Ensaio de tração uniaxial.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV).....	45
5.1.1 Ensaio de Densidade para o PRFV	45
5.1.2 Ensaio de Tração para o PRFV.....	46

5.2 PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) COM ADIÇÃO 1,0% DE <i>PISTIA STRATIOTES</i>	49
5.2.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,0% PS	49
5.2.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,0% PS.....	50
5.3 PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) COM ADIÇÃO 1,5 % DE <i>PISTIA STRATIOTES</i>	53
5.3.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,5% PS.....	53
5.3.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,5% PS	54
5.4 PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) COM ADIÇÃO 1,0 % DE <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i>	57
5.4.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,0% EC	57
5.4.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,0% EC	58
5.5 PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) COM ADIÇÃO 1,5 % DE <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i>	60
5.5.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,5% EC	60
5.5.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,5% EC.	61
5.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DO PRFV X PRFV + 1,0% PS X PRFV + 1,5% PS.....	64
5.7 COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DO PRFV X PRFV + 1,0% EC X PRFV + 1,5% EC.....	68
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por produtos sustentáveis e ecologicamente corretos está pressionando fabricantes de automóveis e pesquisadores de materiais a considerar a importância ambiental de seus produtos em todas as etapas, desde o processamento até a reciclagem e o descarte, com isso, a produção de compósitos biodegradáveis e sustentáveis tem despertado grande interesse (MANICKARAJ *et al.*, 2022).

Pensando em compósitos sustentáveis, segundo Fernandes *et al.*, 2018, a utilização de materiais reciclados e subprodutos previamente considerados resíduos industriais surge como uma alternativa significativa para a mitigação de problemas ambientais, essas práticas não apenas diminuem a extração de matérias-primas do meio ambiente, mas também promovem o aproveitamento e adicionam valor aos resíduos que, de outra forma, seriam destinados a aterros industriais.

Logo, a utilização de um material que seria uma de fonte de poluição ou problema para o meio ambiente no desenvolvimento de um novo material seria uma boa alternativa. Pensando nos materiais compósitos que é definido, pela norma ASTM D3878-07 (2007), como uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material útil à engenharia, com certas propriedades não encontradas nos materiais constituintes, isoladamente. Essa abordagem não apenas reduz os problemas relacionados ao descarte inadequado, como, também, estimula o desenvolvimento de soluções inovadoras voltadas para o atendimento das exigências de sustentabilidade (MOUSTAFA *et al.*, 2019).

Sabendo que as macrófitas aquáticas são essenciais para a estrutura e funcionamento dos ecossistemas, elas representam componentes-chave nos ambientes de água doce, contribuindo para a biodiversidade ao aumentar a riqueza de espécies e influenciar a composição das comunidades (ROCHA *et al.*, 2019). Essas plantas pertencem a diferentes grupos botânicos, principalmente *Pteridophyta* e *Spermatophyta* incluindo várias famílias de licófitas, samambaias e angiospermas, no qual, algumas dessas macrófitas proliferam-se em abundância em ambientes modificados pela intervenção humana e desempenham o papel de indicadores biológicos para avaliar a qualidade ecológica e ambiental dos ecossistemas de água doce (FARES *et al.*, 2020).

No ano de 2022, a poluição da água foi destacada como um problema crítico na degradação ambiental, e a fitorremediação, um tratamento acessível, econômico, de fácil aplicação e eficaz para o tratamento de diferentes tipos de águas residuais, provou ser bem-sucedida no tratamento de solos e plantas, podendo reduzir a presença de metais pesados na água e no solo (WIBOWO *et al.*, 2023).

A seleção de plantas adequadas para cada tipo de água residual é um fator crucial na implementação da fitorremediação, e essas plantas devem ser capazes de crescer rapidamente e acumular grandes quantidades de nutrientes enquanto suas raízes estão imersas em águas superficiais, entre as plantas que atendem a esses critérios, o aguapé (*Eichhornia crassipes*), macrófita flutuante, destaca-se por sua alta capacidade de acumular nutrientes e por seu sistema radicular eficaz para promover um crescimento prolífico, enquanto a alface d'água (*Pistia stratiotes*), possui uma forte capacidade de crescimento em ambientes ricos em nutrientes (NTAKIYIRUTA *et al.*, 2020).

Assim como ocorre com todos os seres vivos, as macrófitas aquáticas eventualmente chegam ao término de seu ciclo vital e com isso caso não sejam removidas da água antes desse ponto, acabam gerando um acúmulo excessivo de biomassa nos ambientes aquáticos. Esse acúmulo pode acarretar diversos problemas durante e após o ciclo de vida das plantas, incluindo dificuldades de navegação devido ao crescimento excessivo e poluição da água, à medida que todos os nutrientes absorvidos são devolvidos ao meio aquático ao final de sua vida (ALVES, 2023).

Diante dessa situação, este estudo propõe o desenvolvimento de um material compósito utilizando as macrófitas aquáticas. O compósito será composto por resina poliéster, fibra de vidro e cinzas de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*. O objetivo principal é mitigar a poluição ambiental através da incorporação desses elementos no novo material evitando assim o retorno dos poluentes ao ecossistema.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as alterações geradas nas propriedades mecânicas ao se adicionar partículas (cinzas) das macrófitas aquáticas das espécies *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* em plásticos reforçados com fibras de vidro (PRFV).

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar a biomassa produzida na fitorremediação em um compósito, finalizando o ciclo;
- Confeccionar compósitos (com diferentes proporções) reforçado com cinzas de macrófita aquática (da espécie *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*) e fibras de vidro;
- Avaliar a influência da adição das cinzas da *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes* nas propriedades avaliadas;
- Realizar ensaio de densidade volumétrica pela norma ASTM D792 (2008);
- Realizar ensaio de tração uniaxial de acordo com a norma ASTM D3039 (2017).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Macrófitas aquáticas

As plantas aquáticas são aquelas capazes de suportar a submersão ao menos parcialmente, especialmente de seus sistemas radiculares, permitindo sua adaptação a ambientes úmidos. Esse grupo inclui as macrófitas aquáticas, abrangendo formas visíveis de vegetação aquática como macroalgas, briófitas e pteridófitas adaptadas ao meio aquático, além de angiospermas originárias de ambientes terrestres que necessitam de solo coberto por água de forma permanente ou temporária para realizar funções vitais específicas (SOUSA *et al.*, 2021).

As macrófitas aquáticas são plantas fotossintetizantes que permanecem submersas, total ou parcialmente, em ambientes de água doce ou salobra, ou flutuam nesses corpos d'água por períodos prolongados, seja por vários meses ou ao longo de todo o ano, sendo que a diversidade de suas formas de vida é determinada pela localização de seus órgãos em relação ao corpo d'água (ALMEIDA; FABRICANTE, 2021).

As macrófitas apresentam uma diversidade de formas biológicas e podem ser classificadas como plantas anfíbias, emergentes flutuantes ou fixas, tradicionalmente denominadas como espécies emersas, com folhas flutuantes e submersas enraizadas, contudo, uma classificação mais recente propõe agrupá-las em herbáceas anfíbias, com caules flutuantes e fixas com folhas flutuantes (COELHO NETO; SOUZA, 2022).

Essas plantas desempenham um papel crucial nos ecossistemas aquáticos, contribuindo para a preservação do lençol freático, a retenção de materiais orgânicos e inorgânicos, a estabilização do clima em escalas local e regional, bem como para a promoção da biodiversidade aquática (MATOS; CRUZ; LIMA, 2023).

As plantas aquáticas como as macrófitas despertam grande interesse no campo da fitorremediação de poluentes aquáticos, devido ao seu rápido crescimento, elevada biomassa, alta tolerância e capacidade significativa de acumular contaminantes, o uso dessas plantas para fitorremediação constitui uma tecnologia ambientalmente sustentável, econômica e inovadora, que contribui eficazmente para a conservação dos ecossistemas aquáticos, abrangendo uma variedade de métodos que incluem a redução, remoção, degradação ou

imobilização de poluentes ambientais, tudo isso sem gerar resíduos secundários, através do uso de plantas verdes (YENTÜRK; DIVARCÏ; ÖZTÜRK, 2022).

3.1.1 *Pistia stratiotes*

A *Pistia stratiotes*, uma planta aquática frequentemente classificada como erva daninha, possui potencial significativo para ser empregada na fitorremediação, pois tem a capacidade de absorver e estabilizar toxinas, incluindo metais pesados, presentes em efluentes líquidos (RATNA; SLAMET, 2020). Essa macrófita desenvolve uma camada densa na superfície da água, o que pode ocasionar obstruções significativas nos cursos d'água e proporcionar um ambiente propício para larvas de mosquitos que atuam como vetores de parasitas filariais, pertencente à família Araceae. Essa espécie floresce nas estações quentes, com frutificação ocorrendo após os períodos de chuva, e cresce flutuando na superfície da água com suas raízes suspensas e submersas, estendendo-se sob a água (PRABAWARDANI *et al.*, 2024).

É possível observar que a *Pistia stratiotes* (Figura 1) pode prosperar em diversas águas residuais industriais, como as provenientes das indústrias de borracha, laticínios, mineração de cromato, curtumes, fundições de aço, usinas de açúcar e fábricas de papel. Assim, sua aplicação na fitorremediação de águas residuais industriais oferece uma solução de baixo custo e baseada na energia solar para a purificação desses efluentes. Além disso, a biomassa gerada durante a fitorremediação pode ser utilizada como matéria-prima para a produção de biogás, pois contém 49,4% de carboidratos, 16,5% de proteínas, 3,6% de lipídios, 17,8% de fibras e 23,8% de cinzas, sendo, portanto, uma valiosa fonte de nutrientes e compostos orgânicos (YENTÜRK; DIVARCÏ; ÖZTÜRK, 2022).

Figura 1 - Macrófita aquática da espécie *Pistia stratiotes*.



Fonte: Adaptado de Boršić e Rubinić (2021)

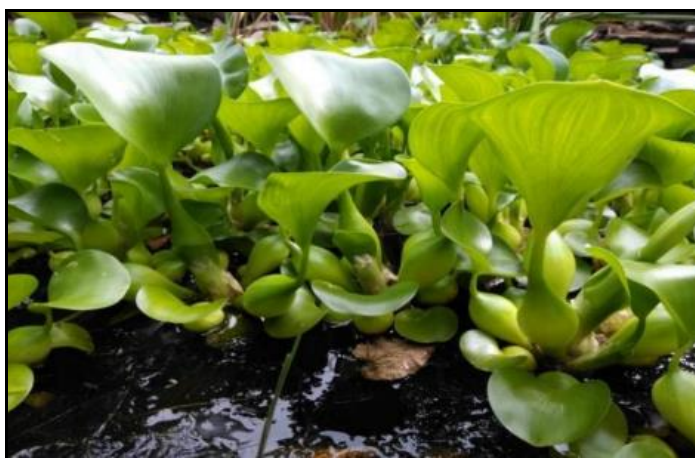
3.1.2 *Eichhornia crassipes*

Pertencente à família Pontederiaceae, o aguapé (*Eichhornia crassipes*) é uma macrófita aquática de crescimento flutuante que se destaca por sua extraordinária adaptabilidade a uma vasta gama de condições ecológicas, tornando-se uma planta de persistência multiétnica, capaz de prosperar em diversas circunstâncias ambientais, como variações de temperatura, iluminação, umidade, salinidade e pH, além de resistir a tempestades, correntes aquáticas e períodos de seca (PRIYA; JEYANTHI, 2023).

O aguapé apresenta sensibilidade a elevados níveis de salinidade, prosperando exclusivamente em águas doces e levemente salobras; geralmente flutuante, fixa-se ao leito exposto dos reservatórios quando os corpos d'água secam, garantindo sua sobrevivência, e demonstra capacidade de tolerar uma ampla variedade de níveis de nutrientes, bem como variações na acidez e alcalinidade, características essas que permitem colonizar e sobreviver em diversos habitats aquáticos (LEKAMGE; WIJEYARATNE; DAHANAYAKA, 2020).

A *Eichhornia crassipes* (Figura 2) reconhecida por seu elevado rendimento biológico, exerce um efeito purificador substancial em águas contaminadas, possuindo a capacidade de remover de forma eficiente nutrientes como nitrogênio e fósforo da água, além de absorver uma ampla gama de metais pesados e compostos tóxicos (SHEN *et al.*, 2023). Além disso, essa macrófita aquática contribui para a inibição do crescimento de algas, desempenhando um papel crucial na melhoria da qualidade da água em ambientes poluídos.

Figura 2 - Macrófita aquática da espécie *Eichhornia crassipes*.



Fonte: Dölle, Wang e Tong (2021).

3.2 Compósitos

O método de modificação mais amplamente aplicado em materiais poliméricos é a produção de compósitos, que são definidos como materiais resultantes da combinação de dois ou mais componentes distintos e frequentemente apresentam propriedades superiores em comparação com os materiais isolados que os constituem (BRUNO, 2022).

Essencialmente formados por duas fases distintas, os materiais compósitos consistem em uma fase contínua, chamada matriz, que envolve a fase dispersa, sendo a interação entre essas fases responsável pela manifestação de características únicas em cada material, culminando na criação de compósitos com propriedades específicas e desejáveis para diversas aplicações (SILVA NETO *et al.*, 2022).

Os materiais formados pela integração de um polímero, seja termoplástico ou termofixo, com fibras de reforço, os compósitos poliméricos podem ser classificados em três categorias principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais (PAULA *et al.*, 2021). A pesquisa e utilização estrutural dos materiais compósitos tem aumentado nas últimas décadas devido aos avanços nos processos de fabricação e ao desenvolvimento de novos compósitos, que envolvem a introdução de novos tipos de reforços, resinas e estruturas laminadas (TINÔ *et al.*, 2022).

A combinação das propriedades distintas das fases que compõem os compósitos reforçados por fibras resulta em um material com propriedades melhoradas. Ao incorporar fibras de alta resistência mecânica em uma matriz de menor densidade e maior ductilidade, o material final exhibe aumentos notáveis no limite de resistência, no módulo de Young e na resistência específica (SILVA NETO *et al.*, 2022).

As propriedades dos compósitos são determinadas pelas características dos materiais que os compõem, assim como pela proporção, distribuição e geometria dos elementos de reforço, a anisotropia nos compósitos é significativamente influenciada pela orientação dos reforços, e as propriedades finais desses materiais dependem crucialmente da interface entre as fases contínua e descontínua, refletindo como os componentes individuais interagem entre si (NÓBREGA *et al.*, 2021).

3.3 Compósitos Híbridos

Os materiais projetados para incorporar diversos tipos de reforços, incluindo fibras e partículas ou uma combinação de múltiplos tipos desses elementos num mesmo compósito, são conhecidos como compósitos híbridos. Essas combinações complexas tendem a proporcionar uma sinergia de propriedades que supera as características apresentadas pelos compósitos que contêm apenas um único tipo de reforço (SANTOS *et al.*, 2021).

O termo "compósito híbrido" surgiu a partir da utilização de laminados que combinam tecidos feitos com diferentes tipos de fibras, como por exemplo, lâminas compostas por fibras de carbono e vidro, frequentemente impregnadas com resina, podendo configurar um compósito híbrido, porém, essa não é a única configuração possível, visto que compósitos que integram metais e fibras, conhecidos como laminados metal-fibra, constituem outra variação de compósitos híbridos (BRITO JÚNIOR; PARDINI; ANCELOTTI JÚNIOR, 2020).

O processo de hibridização fundamenta-se no princípio de empregar diferentes materiais de modo a compensar as limitações mecânicas de um componente que, apesar de suas desvantagens, é crucial para a constituição do compósito, sendo que, adicionalmente, a técnica de hibridização visa conferir ao compósito resultante propriedades mecânicas superiores às que seriam alcançadas por um único material isolado (COSTA; CARLOS; BATISTA, 2022).

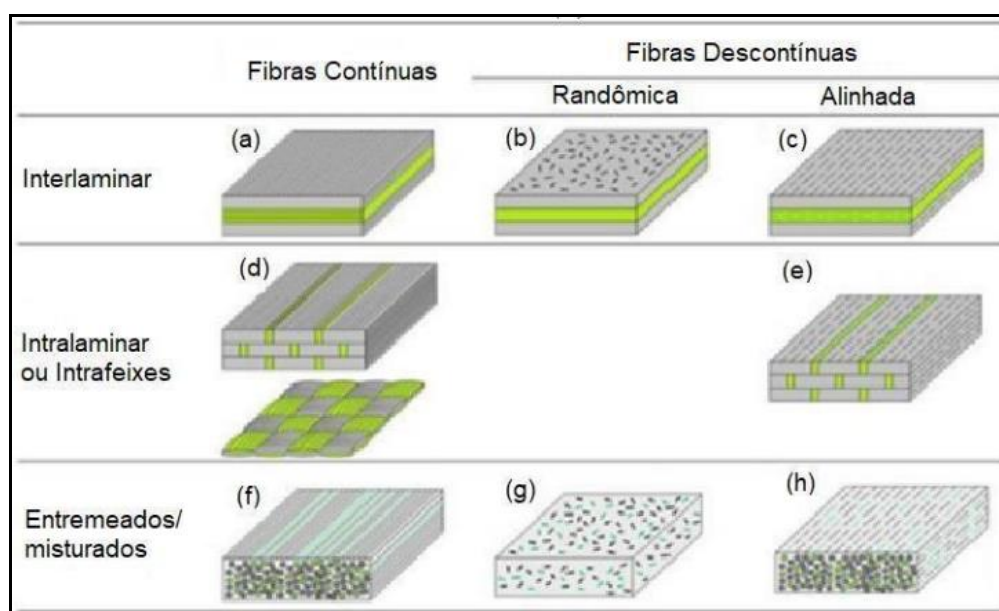
A elaboração de compósitos híbridos envolve a integração de diferentes tipos de reforços ou matrizes em uma única estrutura compósita, e a vasta diversidade de combinações possíveis entre fibras e matrizes para a produção desses compósitos permite a criação de materiais com características específicas e adaptadas a uma ampla gama de aplicações (ALVES, 2023). Segundo Silva (2022), os compósitos híbridos podem ser categorizados conforme ilustrado na Figura 3.

- **Interlaminares** – A hibridização neste caso é alcançada através da sequência de empilhamento adotada durante a fabricação do laminado, onde camadas de tecidos compostos por diferentes tipos de fibras são aplicadas. Essas fibras podem ser apresentadas em diversas formas, incluindo contínua (Figura 3 (a)), descontínua com disposição randômica (Figura 3 (b)) e descontínua com alinhamento (Figura 3 (c)).
- **Intralaminares ou Intrafeixes** – A hibridização é implementada durante o processo de tecelagem, onde, por exemplo, os feixes de urdume e trama são compostos por

fibras de diferentes tipos. As fibras podem ser dispostas de forma contínua (Figura 3 (d)) ou como fibras descontínuas com alinhamento específico (Figura 3 (e)).

- **Entremeados ou Misturados** – A hibridização é efetuada por meio da integração de fibras de diferentes tipos, sem a formação de reforços em forma de tecidos. Essas fibras podem estar presentes em diversas configurações: contínuas (Figura 3 (f)), descontínuas com disposição aleatória (Figura 3 (g)) ou descontínuas com alinhamento definido (Figura 3 (h)).

Figura 3 - Principais arranjos de compósitos híbridos: Interlaminares: contínua (a), descontínua com disposição randômica (b), descontínua com alinhamento (c); Intralaminares ou Intrafeixes: contínua (d), fibras descontínuas com alinhamento específico (e); Entremeados ou Misturados: contínuas (f), descontínuas com disposição aleatória (g), descontínuas com alinhamento definido (h).



Fonte: Adaptado de Silva (2022).

3.4 Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)

Amplamente utilizados no setor industrial, os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (PRFV) são empregados na fabricação de componentes com diferentes formas e aplicações e, segundo dados da Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos, a produção desses materiais alcançou um volume expressivo de 172,2 mil toneladas em 2019, o que destaca sua relevância e crescente demanda no mercado industrial (COLLING *et al.*, 2023).

Estudos recentes investigam o reaproveitamento de resíduos de compósitos poliméricos, como o plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV), para sua incorporação em novos compósitos cerâmicos ou poliméricos e essas pesquisas, ainda iniciais, buscam reduzir o impacto ambiental do descarte inadequado e promover uma abordagem mais sustentável, além disso, a estratégia visa melhorar as propriedades dos novos materiais e diminuir a dependência de matérias-primas virgens, alinhando-se a práticas de economia circular (SOUZA *et al.*, 2020).

De acordo com Brand *et al.*, (2022), nos últimos anos têm sido conduzidas investigações com o propósito de aprofundar a compreensão dos parâmetros que impactam na resistência máxima de PRFVs, tais como:

- A correlação entre os componentes da seção transversal e o comprimento;
- As características mecânicas;
- A distribuição não linear de tensões;
- Estudos numéricos e experimentais que abordam a falha inicial;
- A modelagem do desempenho dos elementos através de equações;
- O comportamento pós-crítico.

As propriedades distintivas desses laminados incluem notáveis características mecânicas, elevada resistência à tração, flexão e impacto, leveza, não condutividade elétrica, resistência à corrosão, bem como a manutenção de integridade estrutural e dimensional em condições extremas de uso, na qual, estas características são atribuídas ao baixo coeficiente de dilatação térmica e à mínima absorção de água apresentados por esses materiais (COLLING *et al.*, 2023).

3.5 Análise de Fratura

A investigação da fratura final enfoca os aspectos conclusivos da ruptura mecânica de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração uniaxial (LIMA, 2022). Conforme a norma ASTM D3039 (2017), é essencial registrar detalhadamente o local e o tipo de falha observada ao final do teste. Além disso, a norma exige que o padrão de fratura seja descrito com base nos códigos de falha padronizados (Quadro 1).

Quadro 1 - Definição dos tipos de fraturas.

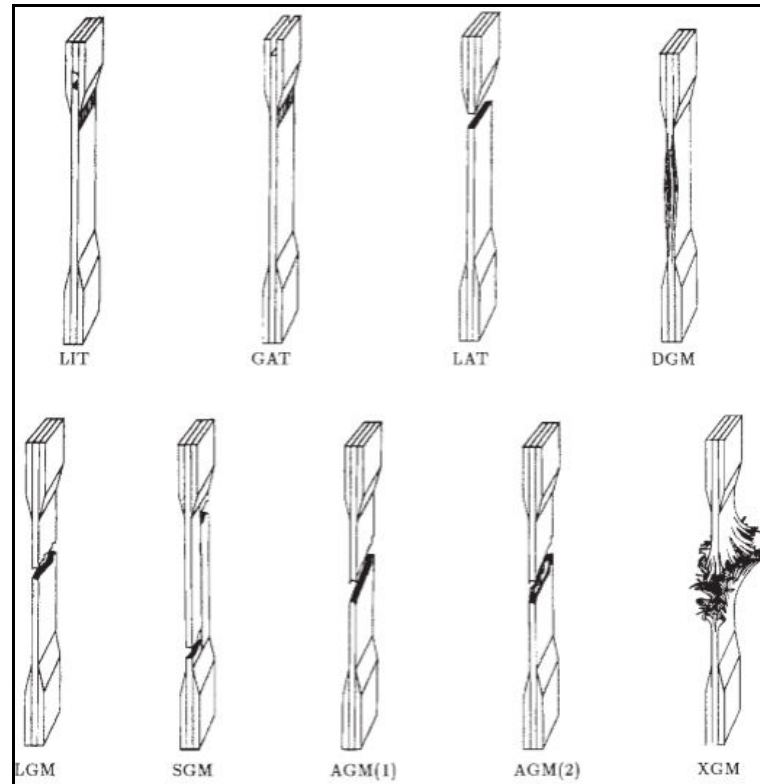
Tipo	Definição (normativa)	Definição geral
LIT	Lateral - Inside - Top	Lateral dentro da lingueta da garra superior
GAT	Grip/Tab - at grip/tab - top	Desaderência da lingueta na garra superior
LAT	Lateral - at grip - top	Lateral na base da lingueta da garra superior
DGM	Edge delamination - gage - middle	Delaminação na borda do corpo de prova e no meio do galgo
LGM	Lateral - gage - middle	Lateral e no meio do galgo
SGM	Longitudinal splitting - gage - middle	No meio do galgo com fendas longitudinais
AGM	Angled - gage - middle	Angular e no meio do galgo
XGM	Explosive - gage - middle	Explosiva e no meio do galgo

Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2017) *apud* Lima (2022).

De acordo com Batista (2017), a análise de fratura pode ser conduzida de duas maneiras distintas: macroscópica e microscópica. A análise macroscópica foca na avaliação da fratura ou dano visível ao longo do corpo de prova, enquanto a microscópica investiga a microestrutura utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Figura 4 apresenta as várias formas de falhas macroscópicas que podem surgir durante a realização de um ensaio de tração uniaxial.

Os dois primeiros tipos de fratura, LIT e GAT (Figura 4), são classificados como inválidos para o ensaio de tração uniaxial, segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM D3039 (2017).

Figura 4 - Tipos de fraturas nos corpos de prova.



Fonte: ASTM D3039 (2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A influência do percentual de cinzas de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes* nas propriedades mecânicas do compósito híbrido reforçado com fibra de vidro será analisada neste estudo, utilizando-se o ensaio de tração uniaxial e o ensaio de densidade volumétrica para a caracterização mecânica e física, respectivamente. É importante salientar que todo o processo anterior, desde a coleta das plantas até a produção das cinzas, foi realizado por Freitas (2018).

Com as cinzas de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*, foram produzidas dez placas de compósitos, a seguir detalhe-se a composições de cada uma das placas produzidas com as respectivas denominações para os seus corpos de provas (CP's) produzidos:

- 2 Placas com fibra de vidro e resina poliéster, CP's denominados como PRFV;
- 2 Placas com fibra de vidro, 1,0% das cinzas de *Pistia stratiotes* e resina poliéster, CP's denominados como PRFV + 1,0% PS;
- 2 Placas com fibra de vidro, 1,0% das cinzas de *Eichhornia crassipes* e resina poliéster CP's denominados como PRFV + 1,0% EC;
- 2 Placas com fibra de vidro, 1,5% das cinzas de *Pistia stratiotes* e resina poliéster CP's denominados como PRFV + 1,5% PS;
- 2 Placas com fibra de vidro, 1,5% das cinzas de *Eichhornia crassipes* e resina poliéster CP's denominados como PRFV + 1,5% EC;

Os percentuais de cinzas das macrófitas aquáticas foram calculados em relação à massa de resina pesada para cada placa. O tempo de gel foi ajustado para permanecer entre 20 e 35 minutos, a fim de otimizar o processo, no qual, esse tempo seria quantos minutos levariam para que a resina inicie o endurecimento. Como resultado, a concentração de catalisador será variada para cada placa de compósito, pois de acordo com a porcentagem de cinzas e a espécie de macrófita a reação varia seu tempo de início.

Posteriormente a fabricação das placas, os corpos de prova serão preparados para o ensaio de densidade volumétrica tendo como referência a norma ASTM D792-08 (2008) e para o ensaio tração uniaxial conforme especificado pela norma ASTM D3039-00 (2017).

4.1 Materiais e Equipamentos

A matriz empregada nos testes desta pesquisa consiste em uma RESINA TERMOFIXA POLIÉSTER CRISTAL 67 ORG IBX (Figura 5), selecionada principalmente por suas vantagens, como baixo custo e boa resistência à umidade, o que a torna adequada para aplicações que exigem durabilidade em ambientes úmidos. De acordo com Thiesen Junior (2016), sua densidade é de aproximadamente $1,10 \text{ g/cm}^3$. Para assegurar o processo de cura e endurecimento do material, foi utilizado um iniciador de cura (catalisador), cuja função é acelerar a reação química que transforma a resina líquida em um material sólido e rígido.

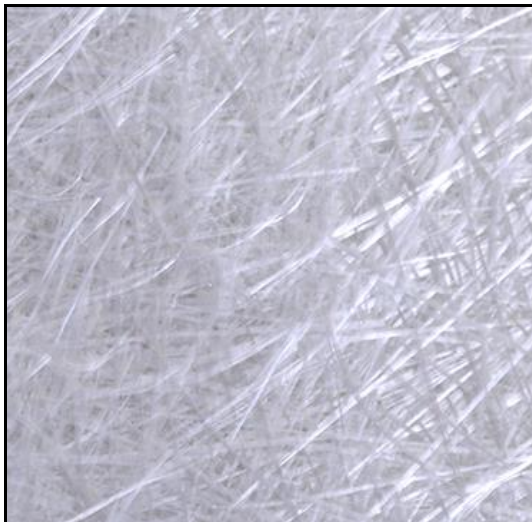
Figura 5 - Resina poliéster e catalisador utilizados.



Fonte: Autoria própria (2024).

A escolha da manta de fibra de vidro (Figura 6) para a realização do trabalho é bastante comum devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência, baixa densidade ($2,5 \text{ g/cm}^3$) de acordo com Thiesen Junior (2016) e boa compatibilidade com diferentes matrizes de resina, incluindo a resina poliéster. Além disso, a fibra de vidro oferece boa resistência à tração e flexão, tornando-a ideal para o desenvolvimento de compósitos estruturais que exigem resistência e durabilidade.

Figura 6 - Manta de fibra de vidro.



Fonte: Autoria própria (2024).

As cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* (Figura 7) foram selecionadas para o estudo como reforço particulado na resina poliéster, combinadas com o reforço de manta de fibra de vidro. O objetivo do estudo foi analisar como esses materiais particulados, juntamente com a manta de fibra de vidro, influenciam as propriedades mecânicas e estruturais da resina poliéster, buscando melhorias em termos de resistência, leveza e viabilidade econômica, além de promover o uso de materiais renováveis e de baixo custo no setor de compósitos.

Figura 7 - Cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*.



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a realização da laminação, ensaio de tração uniaxial e determinação da densidade volumétrica, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Laminação: Desmoldante AmberTech, dois moldes de vidro, rolo metálico;
- Preparação dos corpos de provas: Paquímetro universal 1205-150S INSIZE e micrômetro externo digital Digimess-571811;
- Ensaio de tração uniaxial: EMIC® DL 10000;
- Ensaio de densidade volumétrica: Balança de precisão Shimadzu® AUY220, dessecador.

4.2 Métodos

4.2.1 Processamento da *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*

As amostragens ocorreram em um trecho do Rio Apodi/Mossoró que atravessa a cidade de Mossoró, esse local foi selecionado estrategicamente devido à abundância de macrófitas aquáticas das espécies *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*, além da facilidade de acesso. Foram realizadas quatro coletas no total, em dias diferentes e de maneira aleatória, sem considerar o tamanho ou a idade das plantas, sempre às margens do rio, e as plantas foram armazenadas em recipientes com um pouco de água do próprio rio para mantê-las frescas até a etapa seguinte (FREITAS, 2018).

Posteriormente, as plantas foram transportadas para o laboratório de química geral da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) - Campus Caraúbas. Lá, foram lavadas minuciosamente com água da torneira para eliminar impurezas como solo, insetos, sementes e restos de outras plantas, sendo então enxaguadas com água destilada (FREITAS, 2018).

Em seguida, as plantas foram secas com papel toalha e submetidas a um processo de desidratação em estufa com circulação forçada de ar a 70°C por cerca de 48 horas, até que a desidratação estivesse completa (FREITAS, 2018).

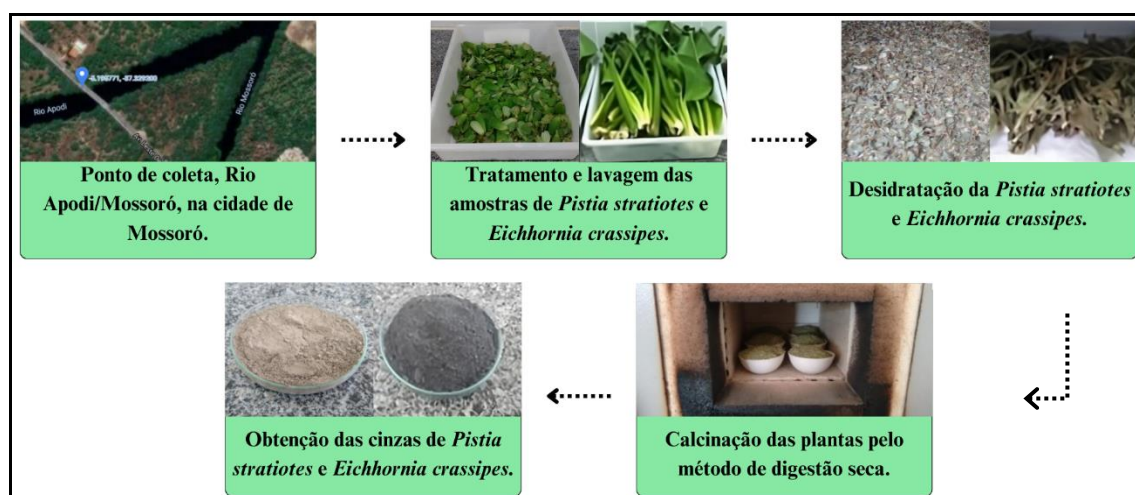
Depois de desidratadas, as plantas foram trituradas em um liquidificador industrial com lâminas de aço inoxidável para reduzir o tamanho das partículas e, finalmente, armazenadas em frascos de plástico previamente limpos e secos, para posterior calcinação (FREITAS, 2018).

Para iniciar o processo de obtenção das cinzas das macrófitas, foi necessário preparar as cápsulas de porcelana, que foram lavadas com água e sabão, seguidas de uma solução de HCl 0,1 mol L⁻¹, e enxaguadas com água destilada, em seguida, foram colocadas em um forno

tipo mufla a 500°C por 3 horas, após esse procedimento, as plantas previamente trituradas foram transferidas para as cápsulas de porcelana preparadas e, posteriormente, calcinadas em um forno mufla a 500°C por 3 horas (FREITAS, 2018).

Depois da calcinação, as amostras foram colocadas em um dessecador para que esfriassem até a temperatura ambiente, seguidamente, foram trituradas com o auxílio de um almofariz e pistilo, e homogeneizadas para obter a cinza final, a qual foi armazenada em um frasco plástico para posterior caracterização e uso na fabricação dos compósitos em diversas proporções (FREITAS, 2018). Todos os passos para a obtenção das cinzas das macrófitas aquáticas podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma com as etapas para obtenção das cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*.



Fonte: Adaptado de Freitas (2018).

Ao final, utilizando a técnica de Fluorescência de Raios-X, Freitas (2018) identificou os elementos que estavam presentes na *Pistia stratiotes* (Tabela 1) e *Eichhornia crassipes* (Tabela 2) coletadas e tratadas.

Tabela 1 - Porcentagem dos elementos presentes nas cinzas da *Pistia stratiotes*.

Elementos	Porcentagens (%)	Elementos	Porcentagens (%)
Ca	17,903	Ti	0,190
Cl	16,758	Sr	0,104
K	14,040	Br	0,048
Na	12,507	Zn	0,022
Si	10,831	Cu	0,019
Mg	10,658	Pd	0,016
Al	6,271	Rb	0,014
P	4,035	V	0,008
Fe	2,417	Cr	0,007
S	2,170	Zr	0,006
Mn	1,973	Y	0,001

Fonte: Adaptado de Freitas (2018).

Tabela 2 - Porcentagem dos elementos presentes nas cinzas da *Eichhornia crassipes*.

Elementos	Porcentagens (%)
Cl	30,567
K	26,132
Ca	15,895
Mg	12,547
Na	7,188
P	5,384
Si	1,091
S	0,732
Mn	0,167
Sr	0,107
Fe	0,092
Br	0,046
Cu	0,021
Rb	0,018
Zn	0,012

Fonte: Adaptado de Freitas (2018).

Os elementos identificados nas plantas por meio da técnica de FRX são categorizados como essenciais, benéficos e não essenciais. Os essenciais englobam macronutrientes, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), que são encontrados em maiores concentrações, além de micronutrientes, como boro (B), cloro (Cl), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), selênio (Se) e zinco (Zn), presentes em quantidades reduzidas (FREITAS, 2018).

Os elementos benéficos, como silício (Si), cobalto (Co), sódio (Na), selênio (Se) e alumínio (Al), contribuem para o crescimento e a produtividade, mas sua ausência não resulta em danos à planta (FREITAS, 2018). Por outro lado, os elementos não essenciais, que podem incluir componentes tóxicos como cromo, cádmio, chumbo e mercúrio, também podem ser encontrados nos tecidos vegetais de algumas plantas (FREITAS, 2018).

4.2.2 Fabricação do molde para confecção do material compósito

Um dos requisitos para a produção das placas é que a espessura apresente uma média de 2,5 mm, conforme estabelecido pela norma ASTM D3039 (2017), para garantir essa medida, foram utilizados espaçadores com a medida expressa anteriormente. Para assegurar a uniformidade, grampos tipo C foram aplicados para comprimir as placas nos pontos onde os espaçadores estavam colocados, sendo a dimensão das placas de vidro de 45 x 70 x 0,1 cm. Esses espaçadores foram estrategicamente posicionados para garantir uma distribuição uniforme e evitar contato direto com o material compósito. A montagem e distribuição dos grampos no molde podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 - Montagem e distribuição dos grampos no molde.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.3 Fabricação do material compósito

Para a produção das placas, foi adotado o método de laminação manual (*Hand Lay-up*). Foram fabricadas 10 placas de compósito, 8 incluíram duas fases de reforço: 4 delas combinaram fibra de vidro com cinzas da *Pistia stratiotes*, enquanto as outras 4 utilizaram fibra de vidro junto com *Eichhornia crassipes*. As 2 placas restantes foram feitas exclusivamente com a manta de fibra de vidro como material de reforço.

Cada placa foi composta por 3 camadas de manta de fibra de vidro, com variações nas proporções de cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* (0%, 1%, e 1,5%, em relação à massa da resina). A matriz escolhida foi uma resina termofixa de poliéster, devido ao seu bom custo-benefício e ampla aplicação em compósitos reforçados com fibra de vidro (PRFV).

Primeiramente, foram preparadas as duas placas de vidro, aplicando-se desmoldante AmberTech em suas superfícies para facilitar a retirada do material posteriormente. Em seguida, iniciou-se o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*), no qual, o primeiro passo foi aplicar uma camada de resina sobre a placa de vidro já tratada com o desmoldante, espalhando-a de maneira uniforme com o auxílio de um rolo de metal. Após isso, foi adicionada a primeira camada da manta de fibra de vidro, seguida por uma nova aplicação de

resina. Com o rolo de metal, a resina foi novamente espalhada de forma homogênea, e esse procedimento foi repetido até que todas as 3 camadas de fibra de vidro fossem colocadas.

Ao término do processo de laminação, os espaçadores foram posicionados para garantir a espessura desejada, e, em seguida, a segunda placa de vidro foi colocada sobre o material. Grampos tipo C foram utilizados para prender e apertar as placas, enquanto pesos foram posicionados sobre o conjunto para assegurar a distribuição uniforme da resina sobre toda a manta. A Figura 10 apresenta todas as etapas realizadas na laminação Hand Lay-up.

Figura 10 - Apresentação do processo de laminação Hand Lay-up.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.4 Fabricação das placas com fibra de vidro e resina pura

Para fins de comparação, foi produzido um compósito reforçado exclusivamente com a manta de fibra de vidro. Inicialmente, pesou-se 496 g de resina para a primeira placa e 502 g para a segunda, em seguida, 0,3% de catalisador (equivalente a 62 gotas) foi adicionado a cada quantidade de resina. A mistura foi agitada com um bastão de vidro por cerca de 1 minuto, e logo após, iniciou-se o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*), aplicando-se 3 camadas de fibra de vidro, conforme descrito no procedimento anterior. Após a laminação, o material foi deixado para curar por 24 horas. Com a cura concluída, a placa foi desmoldada e utilizada para confeccionar os corpos de prova.

4.2.5 Fabricação da placa com fibra de vidro e resina com adição das cinzas de *Pistia stratiotes*

Durante a produção das placas com a adição de cinzas de *Pistia stratiotes*, foram medidas 500 g de resina para cada amostra com 1% de cinzas (total de 2 placas) e 501 g para a primeira placa com 1,5% e 505 g para a segunda placa produzida. As concentrações de catalisador aplicadas foram de 0,6% (125 gotas) para as placas com 1% de cinzas e 0,8% (167 gotas) para as placas com 1,5%, a variação da porcentagem de catalisador mudou devido a inserção das cinzas influenciar no tempo de cura, como observado nos trabalhos de Alves (2023) e Clementino (2023). Primeiro, o catalisador foi inserido na resina e homogeneizado por 1 minuto, posteriormente adicionou-se as cinzas a mistura e novamente houve uma agitação de 1 minuto para assegurar uma homogeneização uniforme, sendo a mistura feita com um bastão de vidro. Em seguida, foi realizado o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*). Após a laminação, o material passou por um período de cura de 24 horas. Concluída a cura, a placa foi desmoldada e os corpos de prova foram confeccionados.

4.2.6 Fabricação da placa com fibra de vidro e resina com adição das cinzas de *Eichhornia crassipes*

No processo de fabricação das placas com adição de cinzas de *Eichhornia crassipes*, foram pesadas 502 g de resina para a primeira placa e 506 g para a segunda contendo 1% de cinzas, já para a porcentagem de 1,5% de cinzas, para a primeira placa foi adicionado 502 g, e 500 g para a segunda placa produzida. As dosagens de catalisador foram ajustadas para 0,5% (105 gotas) na placa com 1% de cinzas e 0,6% (125 gotas) naquelas com 1,5%, a variação da porcentagem de catalisador mudou devido a inserção das cinzas influenciar no tempo de cura.

Inicialmente, o catalisador foi incorporado à resina e a mistura foi agitada por 1 minuto para garantir uma boa homogeneização, em seguida, as cinzas foram adicionadas e a mistura foi agitada novamente por 1 minuto para assegurar a uniformidade. Após isso, o processo de laminação manual (Hand Lay-up) foi realizado. O material laminado foi então submetido a um período de cura de 24 horas. Uma vez concluída a cura, as placas foram desmoldadas e os corpos de prova foram preparados.

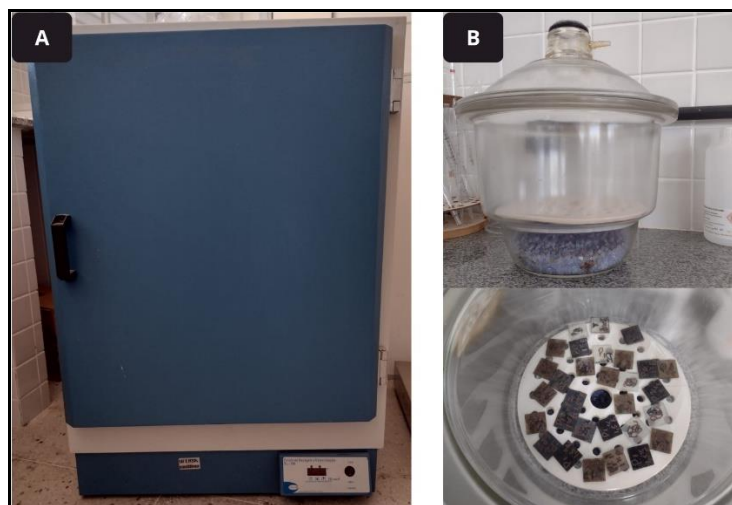
4.2.7 Confeção dos corpos de prova

Para iniciar o processo, os corpos de prova foram cortados com o auxílio de uma esmerilhadeira equipada com disco de corte, a qual foi escolhida devido sua alta rotação não causar delaminação no compósito quando realizado o corte, resultando em dimensões aproximadas de 300 mm de comprimento e 28 mm de largura. Após o corte, para aprimorar o acabamento e eliminar possíveis imperfeições ou descontinuidades, os corpos de prova passaram por um lixamento manual. Nesse processo, foram empregadas lixas d'água de granulometria 80 para a remoção das rebarbas laterais, seguidas por lixas d'água de números 320, 400, 600, 800 e 1200 para o acabamento final. Após o lixamento, os corpos de prova foram ajustados conforme as especificações da norma ASTM D3039 (2017), que exige uma largura de 25 mm com tolerância de $\pm 0,25$ mm e um comprimento de 250 mm. Contudo, devido às limitações da garra da máquina de ensaio de tração uniaxial, foi adotado um comprimento de 240 mm, com um galgo de 127 mm.

4.2.8 Ensaio de densidade volumétrica

Para realizar o ensaio, foram confeccionados cinco corpos de prova a partir de cada placa laminada, com dimensões aproximadas de 25 mm x 25 mm, visando obter mais de 1g. O ensaio seguiu a norma ASTM D792 (2008). Antes do ensaio, os corpos de prova passaram por um processo de secagem e esterilização a 100°C por uma hora em estufa, e depois foram transferidos para um dessecador para resfriamento (Figura 11).

Figura 11 - (A) Estufa utilizada na secagem dos CPs e (B) Dessecador utilizado para resfriar os CPs.



Fonte: Autoria própria (2024).

Posteriormente a preparação dos corpos de prova, iniciou-se o processo de pesagem. Cada corpo de prova foi pesado individualmente e seco, usando uma balança analítica. Em seguida, foi feita a pesagem do afundador, feito de fio de cobre e parcialmente submerso em água. Por último, foram realizadas as pesagens do afundador com cada corpo de prova, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D792 (2008). A pesagem que inclui tanto o afundador quanto o corpo de prova está ilustrada na Figura 12.

Figura 12 - (A) Pesagem dos corpos de prova e (B) Ensaio de densidade volumétrica.



Fonte: Autoria própria (2024).

A densidade volumétrica é calculada utilizando a Equação 1, conforme especificado pela norma ASTM D792 (2008).

$$D = \frac{a * \eta}{(a - b + w)} \quad (1)$$

No qual: D representa a densidade volumétrica do laminado (g/cm^3), a é a massa do corpo de prova seco (g), b é a massa do corpo de prova junto com o afundador imerso na água (g), η é a densidade da água a 23°C ($0,9975 \text{ g/cm}^3$), e w é o peso do afundador parcialmente submerso na água (g).

4.2.9 Ensaio de tração uniaxial

Os testes de tração uniaxial seguiram a norma ASTM D3039 (2017) e foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFERSA, no Campus Mossoró. Para os ensaios, utilizou-se uma máquina de ensaio universal EMIC® DL 10000 (Figura 13) equipada com uma célula de carga de 30 kN e configurada para operar a uma velocidade de 2 mm/min, conforme recomendado pela norma ASTM D3039 (2017).

Figura 13 - Máquina de ensaio universal EMIC utilizada no teste de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os corpos de prova foram preparados seguindo o procedimento descrito no tópico 4.2.7, e separados em 5 grupos como apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 - Nomenclatura e definição dos CPs para o ensaio de tração uniaxial.

Corpos de prova	Definição
PRFV	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro.
PRFV + 1,0% PS	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro com adição de 1,0% das cinzas de <i>Pistia stratiotes</i> .
PRFV + 1,5% PS	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro com adição de 1,5% das cinzas de <i>Pistia stratiotes</i> .
PRFV + 1,0% EC	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro com adição de 1,0 % das cinzas de <i>Eichhornia crassipes</i> .
PRFV + 1,5% EC	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro com adição de 1,5 % das cinzas de <i>Eichhornia crassipes</i> .

Fonte: Autoria própria (2024).

Após a conclusão dos ensaios, os dados de tempo, força e deformação foram coletados diretamente da máquina de teste. Com base nesses dados, calculou-se a tensão máxima de tração (σ) utilizando a Equação 2.

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

Onde: F representa a força registrada pela máquina, e A corresponde à área média da seção transversal do corpo de prova.

Em seguida, determinou-se a deformação (ϵ) dos CPs, aplicando-se a Equação 3.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

Onde: ΔL indica a deformação registrada pela máquina, e L_0 refere-se à medida inicial do galgo (127mm).

Com esses parâmetros, o módulo de elasticidade (E) pode ser determinado para 50% da tensão máxima de tração de cada corpo de prova, utilizando a Equação 4.

$$E = \frac{\tau}{\varepsilon} \quad (4)$$

Onde: τ corresponde à variação da tensão. O desvio padrão foi calculado através do software Excel (2019), fazendo-se uso da função DESVPAD.A.

Por fim, foi feita a diferença percentual média para cada propriedade das placas de mesma composição, através da Equação 5.

$$\left| \left(1 - \frac{\text{maior}}{\text{menor}} \right) \times 100 \right| \quad (5)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Plástico Reforçado com fibra de vidro (PRFV)

5.1.1 Ensaio de Densidade para o PRFV

O ensaio de densidade volumétrica foi realizado de acordo com a norma ASTM D792 (2008), que especifica o método para a determinação da densidade de materiais plásticos reforçados. As amostras testadas (Tabela 3) mostram os valores determinados para o PRFV puro, sendo P1 referindo-se os dados da placa 1 e P2 representa os valores da placa 2.

Tabela 3 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm^3) para o PRFV.

Placa	Densidades (g/cm^3)	Valor médio com Desvio Padrão
PRFV P1	1,4204	1,3899 $\pm$ 0,0325
	1,3557	
	1,3936	
PRFV P2	1,4228	1,3924 $\pm$ 0,0270
	1,3713	
	1,3830	
Valor Médio Total com DP	1,3911 $\pm$ 0,0267	

Fonte: Autoria própria (2024).

O PRFV apresentou um valor médio total de $1,3911 \pm 0,0267 \text{ g/cm}^3$. O desvio padrão de $\pm 0,0267$ indica uma boa homogeneidade no material. Ao analisar a pesquisa de Brito *et al.* (2023), observa-se que o dado obtido para densidade volumétrica do PRFV foi de $1,48 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Já o trabalho de Alves (2023) o qual apresentou 10 camadas de tecido de fibra de vidro obteve um valor de $1,6228 \pm 0,0057 \text{ g/cm}^3$, destaca-se que esse autor utilizou tecido de fibra de vidro. Os resultados obtidos nesse trabalho estão coerentes com a literatura.

Os dados de densidade para ambas as placas estão em concordância apresentando pela Equação 5 o valor de 0,18% de diferença percentual, assim não apresentando grandes discrepâncias entre ambas. Além disso, ao se avaliar a média com o desvio padrão, percebe-se que valores não apresentam uma diferença significativa. Logo, como a densidade é constituída pela matriz polimérica de densidade $1,10 \text{ g/cm}^3$ e fibra de vidro que apresenta

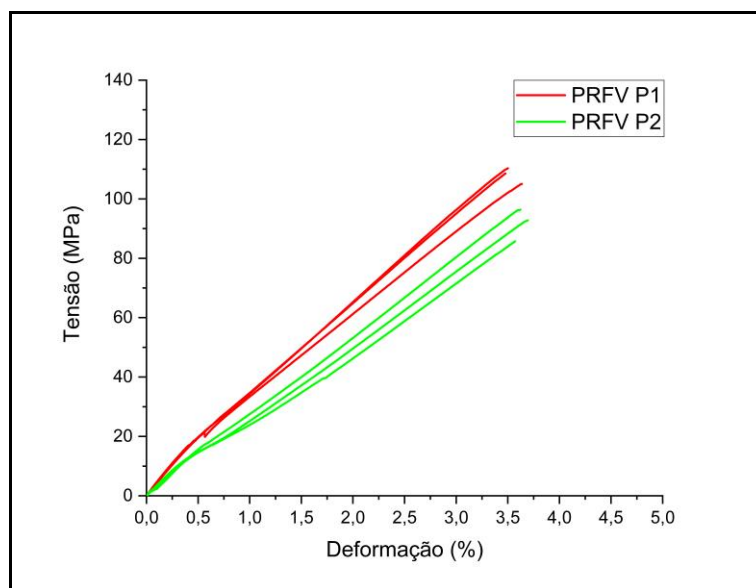
densidade $2,5 \text{ g/cm}^3$, pode-se concluir que ambas as placas apresentam percentuais de constituintes semelhantes.

5.1.2 Ensaio de Tração para o PRFV

O ensaio inicial foi conduzido nos corpos de prova compostos por resina poliéster e fibra de vidro. Os resultados, apresentados no gráfico Tensão x Deformação (Figura 14), evidenciam as curvas principais que relacionam esses dois parâmetros. O comportamento observado foi predominantemente linear, caracterizando uma resposta típica de materiais frágeis.

A Tabela 4 apresenta as médias de tensão máxima total que é de $99,81 \pm 9,75 \text{ MPa}$, deformação de $3,58 \pm 0,08 \text{ mm/mm}$, e módulo de elasticidade de $2,85 \pm 0,43 \text{ GPa}$. Apesar de o desvio padrão para a tensão máxima ser de $9,75 \text{ MPa}$, destaca-se que por se tratar de uma laminação manual o desvio padrão é aceitável, sugerindo uma consistência geral no desempenho do material.

Figura 14 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV.



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV.

	Tensão Máxima (MPa)		Deformação (mm/mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
Placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa
PRFV P1	110,34	107,99 ± 2,69	3,50	3,54 ± 0,09	3,29	3,23 ± 0,10
	105,05		3,64		3,11	
	108,57		3,48		3,29	
PRFV P2	92,77	91,62 ± 5,43	3,69	3,63 ± 0,06	2,47	2,48 ± 0,18
	85,71		3,57		2,30	
	96,39		3,62		2,66	
Valor Médio Total	99,81 ± 9,75		3,58 ± 0,08		2,85 ± 0,43	

Fonte: Autoria própria (2024).

Esses valores servem como referência básica para comparar a influência dos aditivos em PRFV reforçado com manta. De acordo com Brito *et al.* (2023), o valor de resistência a tração, deformação e módulo de elasticidade do PRFV, composto por manta de fibra de vidro e resina poliéster, em seu trabalho foi de $95,17 \pm 9,65$ MPa, $3,49 \pm 0,43$ % e $3,00 \pm 0,20$ GPa, respectivamente, mostrando assim coerência entre os resultados apresentados.

Souza *et al.* (2018) comparou a resistência à tração de uma mistura entre camadas de tecido de fibra de juta e manta de fibra de vidro. A análise revelou que o corpo de prova laminado com três camadas de manta de fibra de vidro apresentou a maior resistência à tração entre os ensaiados, atingindo $105,58 \pm 7,16$ MPa, resultado coerente com os dados do estudo.

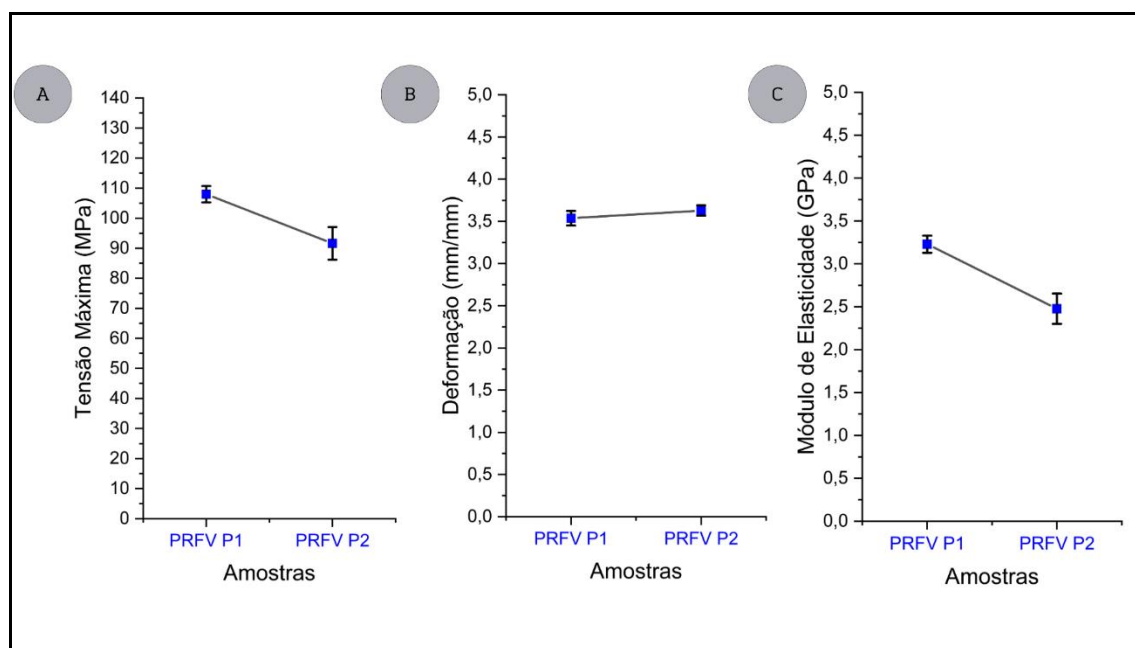
A Figura 15 exibe os valores médios do PRFV, acompanhados dos respectivos desvios padrões, comparando as placas P1 e P2 em relação à tensão máxima (Figura 15 (A)), deformação (Figura 15 (B)) e módulo de elasticidade (Figura 15 (C)), respectivamente. Com base na Equação 5, foi possível calcular a diferença percentual entre as duas placas laminadas, resultando em 17,87% para a tensão máxima, 2,48% para a deformação e 30,24% para o módulo de elasticidade. Observa-se pela Figura 16, observando os valores médios em conjunto com o desvio padrão, que na Figura 15 (B) não existe uma diferença significativa entre as deformações sofridas nas duas placas. Porém, a resistência (Figura 15 (A)) e o módulo (Figura 15 (C)) indicam uma possível uma diferença significativa entre os valores médios das placas.

Observa-se que a maior variação foi para a resistência a tração e o módulo de elasticidade, essa diferença pode ter ocorrido devido o tempo de cura ser diferente entre as placas, ou a formação de bolhas ter ocorrido em maior quantidade em determinada placa devido o processo de fabricação manual, com isso alterado essa propriedade, já que, pelo resultado do ensaio de densidade (Tabela 3) os constituintes estão semelhantes em ambas as placas. Considerando que a deformação não teve uma diferença significativa, a presença de bolhas é a justificativa o mais provável para o ocorrido.

A Figura 16 apresenta a análise visual das fraturas nos corpos de prova de PRFV, avaliadas conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D3039 (2017), como mostrado na Figura 4.

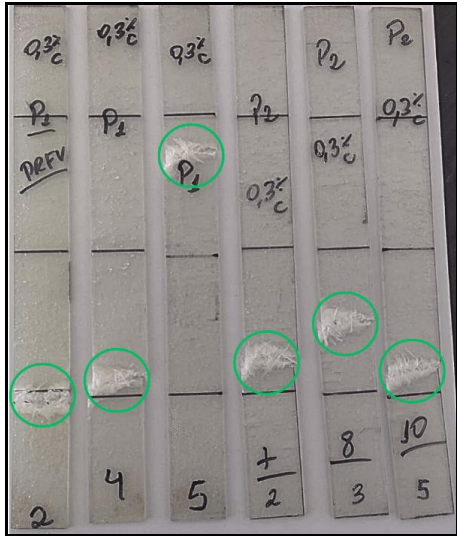
A análise das fraturas observadas na Figura 16 revela a presença de dois tipos distintos de rupturas nos corpos de prova. Esses tipos de fraturas estão detalhados no Quadro 1, sendo as ocorridas no presente trabalho a LAT e LGM. Destaca-se um dos CP's teve a fratura bem próxima da linha, e no momento do ensaio a fratura se encontrava fora da garra, o que é definida como LAT pela norma e é válida. Verifica-se que as rupturas ocorreram dentro da região útil, o que caracteriza as fraturas como conformes e adequadas para validação dos resultados obtidos.

Figura 15 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 16 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 Plástico Reforçado com fibra de vidro (PRFV) com adição 1,0% de *Pistia stratiotes*

5.2.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,0% PS

As amostras testadas (Tabela 5) mostram os valores determinados para o PRFV + 1,0% PS, sendo apresentado um valor médio total de $1,4022 \pm 0,0276 \text{ g/cm}^3$. O desvio padrão de $\pm 0,0276$ indica uma boa homogeneidade no material.

Tabela 5 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm^3) para o PRFV +1,0% PS.

Placa	Densidades (g/cm^3)	Valor médio com Desvio Padrão
PRFV + 1,0% PS P1	1,3843	1,3785 $\pm$ 0,0128
	1,3638	
	1,3874	
PRFV + 1,0% PS P2	1,4345	1,4259 $\pm$ 0,0076
	1,4206	
	1,4225	
Valor Médio Total com DP	1,4022 $\pm$ 0,0276	

Fonte: Autoria própria (2024).

O estudo de Clementino (2023) investigou o impacto da adição de 1,0% de cinzas de *Pistia stratiotes* nas propriedades mecânicas do PRFV, obtendo um valor de densidade volumétrica de $1,65 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, utilizando 10 camadas de tecido de fibra de vidro como reforço. Observa-se que os resultados estão coerentes com a literatura, visto que no presente trabalho foi utilizado apenas 3 camadas de tecido de fibra de vidro.

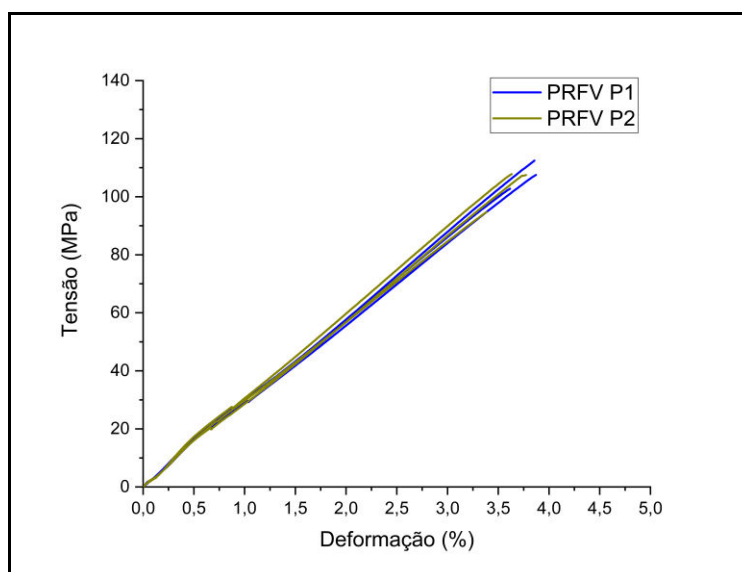
A diferença percentual (Equação 5) observada entre as densidades das placas é de 3,44%, indicando que os valores estão em boa concordância, sem grandes discrepâncias entre eles. Apesar do processo manual envolvido na fabricação das placas e corpos de prova, os quais contemplam erros associados, conclui-se que ambas as placas possuem composições similares, com percentuais de constituintes bastante próximos.

5.2.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,0% PS

O segundo ensaio de tração foi conduzido utilizando corpos de prova com a incorporação de 1,0% de cinzas de *Pistia stratiotes*. Os resultados obtidos estão representados no gráfico da Figura 17, enquanto a Tabela 6 resume os valores médios e os desvios padrão referentes à tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade.

A análise do gráfico apresentado (Figura 17) revela um comportamento linear até a ruptura, indicando uma resposta mecânica predominantemente frágil. As curvas das diferentes amostras mostram pouca variação, sugerindo uma boa uniformidade entre os corpos de prova testados.

Figura 17 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,0% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,0% PS.

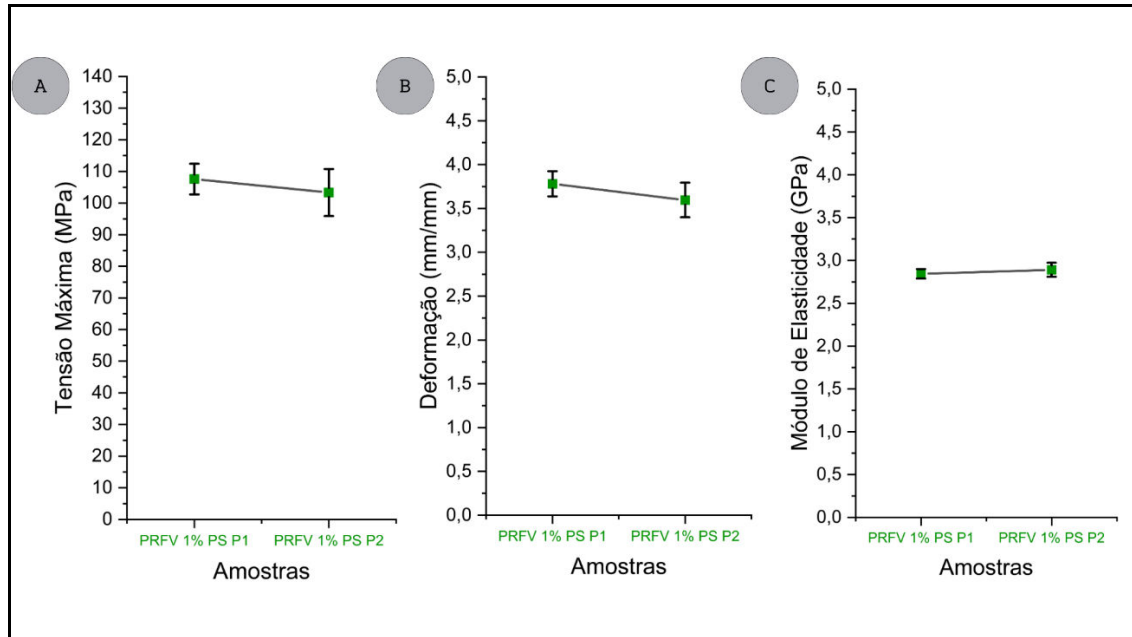
	Tensão Máxima (MPa)		Deformação (mm/mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
Placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa
PRFV +1,0% PS P1	112,47		3,86		2,88	
	102,77	107,59 $\pm 4,85$	3,62	3,78 $\pm 0,14$	2,87	2,84 $\pm 0,06$
	107,53		3,87		2,78	
PRFV +1,0% PS P2	94,74		3,38		2,85	
	107,48	103,33 $\pm 7,44$	3,77	3,60 $\pm 0,20$	2,84	2,89 $\pm 0,08$
	107,77		3,63		2,98	
Valor Médio Total	105,46 $\pm$ 6,08		3,69 $\pm$ 0,18		2,87 $\pm$ 0,07	

Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 6 apresenta as médias de tensão máxima total que é de $105,46 \pm 6,08$ MPa, deformação de $3,69 \pm 0,18$ mm/mm, e módulo de elasticidade de $2,87 \pm 0,07$ GPa. O desvio padrão para a tensão máxima de $\pm 6,08$ MPa destaca-se por ser baixo, apesar de se tratar de uma laminação manual, sugerindo uma consistência geral no desempenho do material. Além do módulo de elasticidade que se destaca apresentando um comportamento elástico estável entre as amostras, mostrando uma boa repetibilidade nos resultados. Segundo Clementino (2023) seu trabalho obteve valores de resistência à tração de $336,58 \pm 1,60$ MPa, deformação de $6,69 \pm 0,26\%$, e módulo de elasticidade de $4,83 \pm 0,30$ GPa, utilizando 10 camadas de tecido de fibra de vidro como reforço.

A Figura 18 apresenta os valores médios de PRFV + 1,0% PS, acompanhados pelos respectivos desvios padrões, comparando as placas P1 e P2 em relação à tensão máxima (Figura 18 A), deformação (Figura 18 B) e módulo de elasticidade (Figura 18 C). Utilizando a Equação 5, foram calculadas as diferenças percentuais entre as duas placas laminadas, resultando em uma variação de 4,12% para a tensão máxima, 5% para a deformação e 1,8% para o módulo de elasticidade. Analisando as médias com os respectivos DP, percebe-se que para nenhuma propriedade ocorreu uma diferença significativa.

Figura 18 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,0% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 19 mostra a análise visual das fraturas nos corpos de prova de PRFV + 1,0% PS, realizadas de acordo com os parâmetros da norma ASTM D3039 (2017) presente na Figura 4. Observa-se que as fraturas se localizaram dentro da zona útil, o que confirma sua conformidade e adequação para a validação dos resultados experimentais obtidos. As rupturas identificadas na Figura 19 mostram apenas um tipo diferente de fratura (Quadro 1) nos corpos de prova, sendo classificada como LGM.

Figura 19 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,0% PS após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.3 Plástico Reforçado com fibra de vidro (PRFV) com adição 1,5 % de *Pistia stratiotes*

5.3.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,5% PS

As amostras testadas, conforme apresentado na Tabela 7, indicam os valores de densidade para o PRFV + 1,0% PS, com uma média total de $1,4306 \pm 0,0195 \text{ g/cm}^3$. O desvio padrão de $\pm 0,0195$ demonstra uma boa homogeneidade no material, sugerindo que as variações entre as amostras são pequenas e que o processo de fabricação resultou em uma distribuição uniforme das propriedades do material.

Tabela 7 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm^3) para o PRFV +1,5% PS.

Placa	Densidades (g/cm^3)	Valor médio com Desvio Padrão
PRFV + 1,5% PS P1	1,4049	1,4204 $\pm$ 0,0183
	1,4156	
	1,4406	
PRFV + 1,5% PS P2	1,4517	1,4408 $\pm$ 0,0175
	1,4501	
	1,4207	
Valor Médio Total com DP	1,4306 $\pm$ 0,0195	

Fonte: Autoria própria (2024).

Brito *et al.* (2023) investigou o impacto da adição de 10% de pó de calcário em relação a massa de resina poliéster, sendo a granulometria do pó de $<53\mu\text{m}$, obtendo um valor de densidade volumétrica de $1,51 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, utilizando 3 camadas de manta de fibra de vidro como reforço. Observa-se que os resultados estão coerentes com a literatura, visto que no presente trabalho foi utilizado também 3 camadas de manta de fibra de vidro, porém apenas 1,5 % de cinzas de *Pistia stratiotes*.

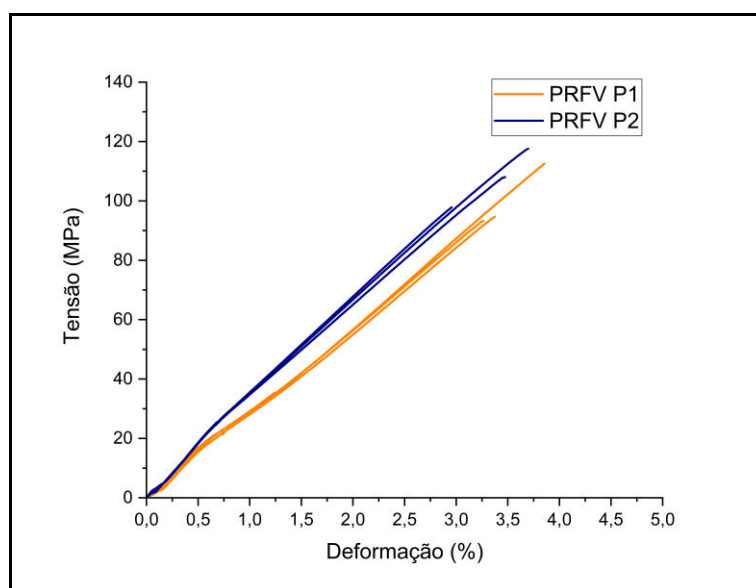
A diferença percentual observada entre as densidades, calculada pela Equação 5, é de 1,44%, indicando uma boa concordância entre os valores, sem discrepâncias significativas. Embora o processo manual de fabricação das placas e dos corpos de prova esteja sujeito a possíveis erros, conclui-se que ambas as placas possuem composições similares, com percentuais de constituintes bastante próximos.

5.3.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,5% PS

O terceiro ensaio de tração uniaxial foi realizado com os corpos de prova contendo 1,5% de adição de cinzas de *Pistia stratiotes*. Os dados resultantes são apresentados no gráfico da Figura 20, e a Tabela 8 traz um resumo dos valores médios e desvios padrão correspondentes à tensão máxima, deformação e ao módulo de elasticidade, obtidos durante o ensaio.

A Tabela 8 apresenta as médias de tensão máxima total que é de $104,00 \pm 10,14$ MPa, deformação de $3,44 \pm 0,32$ mm/mm, e módulo de elasticidade de $3,08 \pm 0,32$ GPa. O desvio padrão para a tensão máxima de $\pm 10,14$ MPa está dentro dos limites aceitáveis, apesar de se tratar de uma laminação manual, sugerindo uma consistência geral no desempenho do material.

Figura 20 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,5% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

Em comparação, no estudo de Brito *et al.* (2023), os valores de resistência à tração reportados foram de $87,16 \pm 8,28$ MPa, com deformação de $3,27 \pm 0,22\%$ e módulo de elasticidade de $3,05 \pm 0,20$ GPa, utilizando quatro camadas de manta de fibra de vidro como reforço, além da adição de 10% de pó de calcário com granulometria inferior a $53 \mu\text{m}$. Nesse caso, houve uma redução nas propriedades mecânicas em decorrência da adição do pó de calcário. Esse comportamento contrasta com os resultados do presente estudo, no qual foram empregadas três camadas de manta de fibra de vidro e, mesmo com a inclusão da macrófita, as propriedades mecânicas do material permaneceram estáveis, sem prejuízos significativos.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,5% PS.

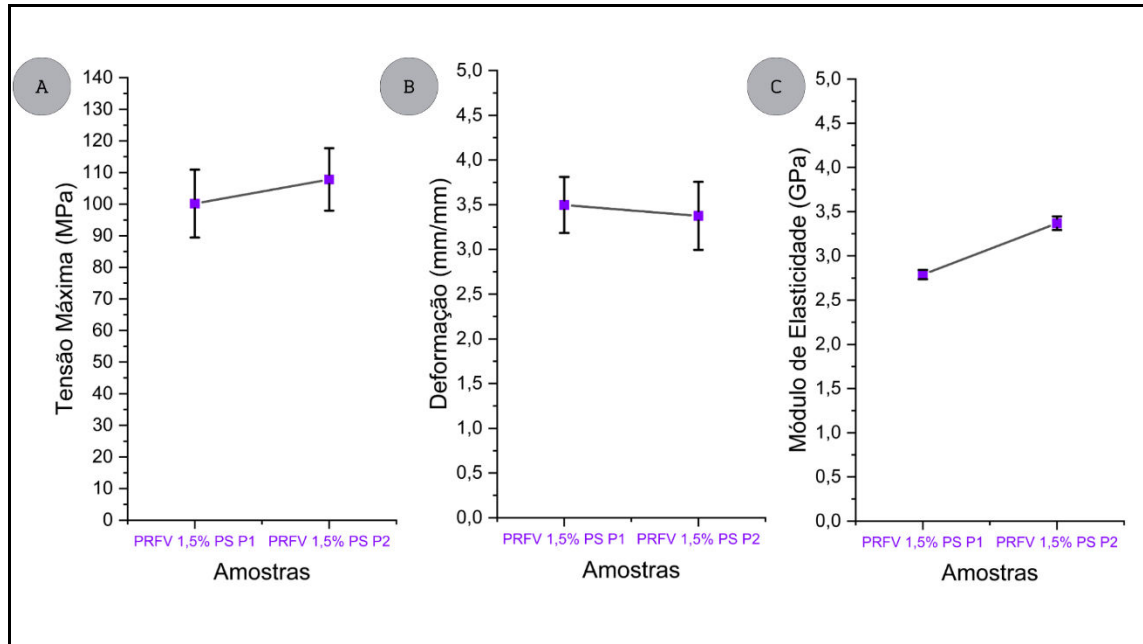
	Tensão Máxima (MPa)		Deformação (mm/mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
Placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa
PRFV +1,5% PS P1	94,72	100,17 ± 10,74	3,38	3,50 ± 0,31	2,73	2,79 ± 0,05
	93,24		3,26		2,80	
	112,54		3,85		2,83	
PRFV +1,5% PS P2	108,05	107,82 ± 9,88	3,47	3,38 ± 0,38	3,30	3,37 ± 0,08
	117,59		3,70		3,36	
	97,83		2,96		3,45	
Valor Médio Total	104,00 ± 10,14		3,44 ± 0,32		3,08 ± 0,32	

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 21 ilustra os valores médios de PRFV + 1,5% PS, acompanhados de seus respectivos desvios padrão, comparando as placas P1 e P2 em relação à tensão máxima (Figura 21 A), deformação (Figura 21 B) e módulo de elasticidade (Figura 21 C), observando-se as tarjas amarelas, somente o módulo de elasticidade indica apresentar uma diferença significativa. A partir da Equação 5, foram calculadas as diferenças percentuais entre as duas placas laminadas, obtendo-se uma variação de 7,64% para a tensão máxima, 3,55% para a deformação e 20,79% para o módulo de elasticidade.

Verifica-se que a maior variação ocorreu no módulo de elasticidade, possivelmente em decorrência de diferenças no tempo de cura entre as placas ou da maior presença de bolhas em uma delas, consequência do processo de fabricação manual. No entanto, conforme indicado pelos resultados do ensaio de densidade (Tabela 7), os constituintes das placas podem ser considerados semelhantes, minimizando a possibilidade de variações substanciais na composição do material.

Figura 21 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,5% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 22, a inspeção visual das fraturas dos corpos de prova de PRFV + 1,5% PS foi realizada segundo as diretrizes da norma ASTM D3039 (2017) presentes na Figura 4. As fraturas ocorreram na região útil dos corpos de prova, assegurando sua conformidade e a validação dos resultados experimentais obtidos. Os resultados apresentados na Figura 22 permitem identificar apenas um tipo de fratura nos corpos de prova, a qual pode ser classificada como LGM (Quadro 1) para todos os CP's.

Figura 22 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,5% PS após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.4 Plástico Reforçado com fibra de vidro (PRFV) com adição 1,0 % de *Eichhornia crassipes*

5.4.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,0% EC

As amostras testadas, conforme exposto na Tabela 9, apresentam os valores de densidade para o PRFV + 1,0% EC, com uma média total de $1,4114 \pm 0,0121$ g/cm³. O desvio padrão de $\pm 0,0121$ indica uma boa homogeneidade do material, sugerindo que as variações entre as amostras são pequenas. Esse resultado reforça que o processo de fabricação foi eficaz em garantir uma distribuição uniforme das propriedades do material.

No estudo de Alves (2023), foram utilizadas 10 camadas de tecido de fibra de vidro com a incorporação de cinzas de *Eichhornia crassipes*, obtendo-se uma densidade de $1,6359 \pm 0,0075$ g/cm³ para a adição de 1,0% da macrófita. Esses resultados estão de acordo com os valores reportados na literatura, sendo importante ressaltar que, no presente trabalho, foram empregadas apenas 3 camadas de manta de fibra de vidro, o que reforça a consistência dos dados obtidos.

Tabela 9 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm³) para o PRFV +1,0% EC.

Placa	Densidades (g/cm ³)	Valor médio com Desvio Padrão
PRFV + 1,0% EC P1	1,3967	1,4160 $\pm$ 0,0173
	1,4301	
	1,4212	
PRFV + 1,0% EC P2	1,4082	1,4068 $\pm$ 0,0012
	1,4060	
	1,4062	
Valor Médio Total com DP	1,4114 $\pm$ 0,0121	

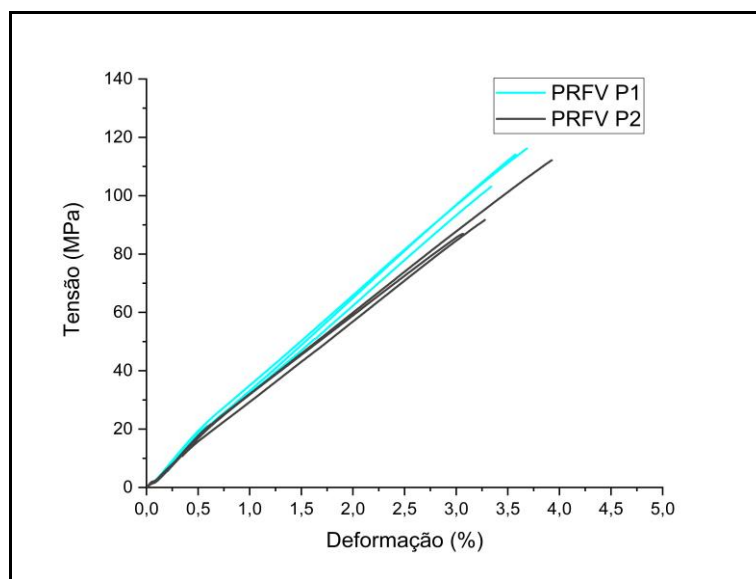
Fonte: Autoria própria (2024).

A diferença percentual entre as densidades, calculada pela Equação 5, foi de 0,65%, evidenciando uma boa concordância entre os resultados, sem variações significativas. Embora o processo de fabricação manual das placas e corpos de prova possa estar sujeito a erros, os resultados indicam que ambas as placas apresentam composições similares, com percentuais de constituintes praticamente idênticos.

5.4.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,0% EC

O quarto ensaio de tração uniaxial foi conduzido em corpos de prova com 1,0% de adição de cinzas de *Eichhornia crassipes*. Os resultados obtidos são ilustrados no gráfico da Figura 23, enquanto a Tabela 10 apresenta um resumo dos valores médios e respectivos desvios padrão referentes à tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade registrados durante o ensaio.

Figura 23 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,0% EC.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 10 apresenta os valores médios para o PRFV com adição de 1,0% de cinzas de *Eichhornia crassipes*, registrando uma tensão máxima de $104,05 \pm 12,34$ MPa, uma deformação de $3,48 \pm 0,31$ mm/mm e um módulo de elasticidade de $3,10 \pm 0,16$ GPa. Embora o desvio padrão da tensão máxima ser de $\pm 12,34$ MPa, é compreensível dada a natureza do processo manual de laminação, que tende a introduzir variações nos laminados.

Em comparação, o estudo de Alves (2023) reportou valores de $356,89 \pm 11,23$ MPa para a resistência à tração, $6,90 \pm 0,22\%$ de deformação, e um módulo de elasticidade de $4,99 \pm 0,13$ GPa, utilizando dez camadas de tecido de fibra de vidro reforçado com 1,0% de cinzas de EC. Nesse caso, o uso de um número maior de camadas e de tecido de fibra de vidro, material mais resistente que a manta, resultou em um aumento das propriedades mecânicas.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,0% EC.

	Tensão Máxima (MPa)		Deformação (mm/mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
Placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa
PRFV +1,0% EC P1	116,18		3,68		3,31	
	114,18	111,16 ± 7,03	3,58	3,53 ± 0,18	3,25	3,22 ± 0,10
	103,13		3,34		3,11	
PRFV +1,0% EC P2	91,70		3,28		2,86	
	86,93	96,93 ± 13,40	3,07	3,42 ± 0,45	3,05	2,97 ± 0,10
	112,16		3,93		3,01	
Valor Médio Total	104,05±12,34		3,48±0,31		3,10±0,16	

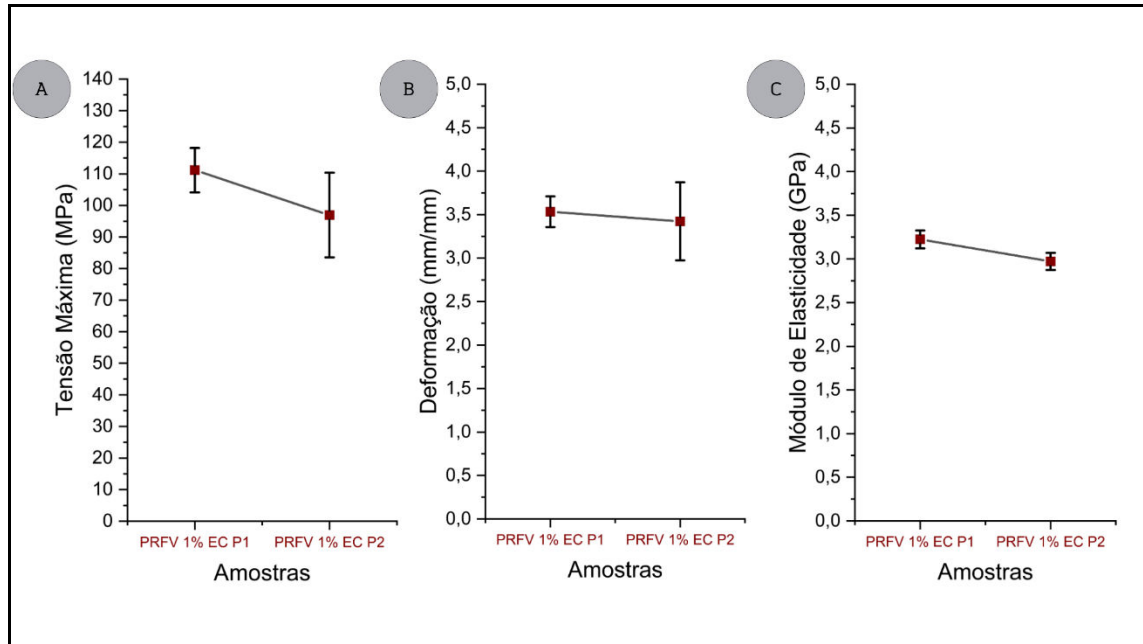
Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 24 ilustra os valores médios de PRFV + 1,0% EC, com seus respectivos desvios padrão, comparando as placas P1 e P2 em relação à tensão máxima (Figura 24 A), deformação (Figura 24 B) e módulo de elasticidade (Figura 24 C). A partir da Equação 5, foram determinadas as diferenças percentuais entre as duas placas, com variações de 14,68% na tensão máxima, 3,22% na deformação e 8,42% no módulo de elasticidade. Observa-se, pela Figura 24 (A), que ao analisarmos o valor médio com os respectivos DP, pode-se dizer que não se pode afirmar que ocorreu uma diferença significativa.

A maior variação foi observada na tensão máxima, possivelmente devido à formação de um maior número de bolhas em uma das placas durante o processo manual de laminação. Reforçando os resultados do ensaio de densidade (Tabela 9) indicam que as composições das placas são semelhantes, o que minimiza a possibilidade de grandes variações nos constituintes do material.

Na Figura 25, a inspeção visual das fraturas dos corpos de prova de PRFV + 1,0% EC foi realizada segundo as diretrizes da norma ASTM D3039 (2017) presentes na Figura 4. As fraturas ocorreram na região útil dos corpos de prova, assegurando sua conformidade e a validação dos resultados experimentais obtidos. Os dados apresentados na Figura 25 destacam a ocorrência de apenas um tipo de fratura (Quadro 1) nos corpos de prova, a qual é denominada de LGM.

Figura 24 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,0% EC.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 25 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,0% EC após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.5 Plástico Reforçado com fibra de vidro (PRFV) com adição 1,5 % de *Eichhornia crassipes*

5.5.1 Ensaio de Densidade para o PRFV + 1,5% EC

As amostras analisadas, conforme descrito na Tabela 11, mostram os valores de densidade para o PRFV + 1,5% EC, com uma média geral de $1,4150 \pm 0,0283 \text{ g/cm}^3$. O

desvio padrão de $\pm 0,0283$ reflete uma considerável homogeneidade do material, indicando que as variações entre as amostras não foram discrepantes. Esses resultados sugerem que o processo de fabricação foi bem-sucedido em proporcionar uma distribuição uniforme das propriedades do material.

No estudo conduzido por Alves (2023), foram empregadas 10 camadas de tecido de fibra de vidro, associadas à incorporação de cinzas de *Eichhornia crassipes*, alcançando uma densidade de $1,6389 \pm 0,0042 \text{ g/cm}^3$ com a adição de 1,5% da macrófita. Esses resultados se alinham com os valores previamente descritos na literatura, reforçando a confiabilidade dos dados. No entanto, cabe destacar que, no presente trabalho, foram utilizadas apenas 3 camadas de manta de fibra de vidro, o que reforça a consistência dos resultados obtidos, mesmo com um número reduzido de camadas.

Tabela 11 - Dados do ensaio de densidade volumétrica (g/cm^3) para o PRFV +1,5% EC.

Placa	Densidades (g/cm^3)	Valor médio com Desvio Padrão
PRFV + 1,5% EC P1	1,4283	1,4265 $\pm$ 0,0052
	1,4207	
	1,4306	
PRFV + 1,5% EC P2	1,3687	1,4035 $\pm$ 0,0398
	1,4469	
	1,3949	
Valor Médio Total com DP	1,4150 $\pm$ 0,0283	

Fonte: Autoria própria (2024).

A diferença percentual entre as densidades, calculada pela Equação 5, foi de 1,64%, demonstrando uma boa concordância entre os valores e a ausência de variações significativas. Embora o processo manual de fabricação das placas e dos corpos de prova possa estar suscetível a pequenos erros, os resultados indicam que ambas as placas possuem composições semelhantes.

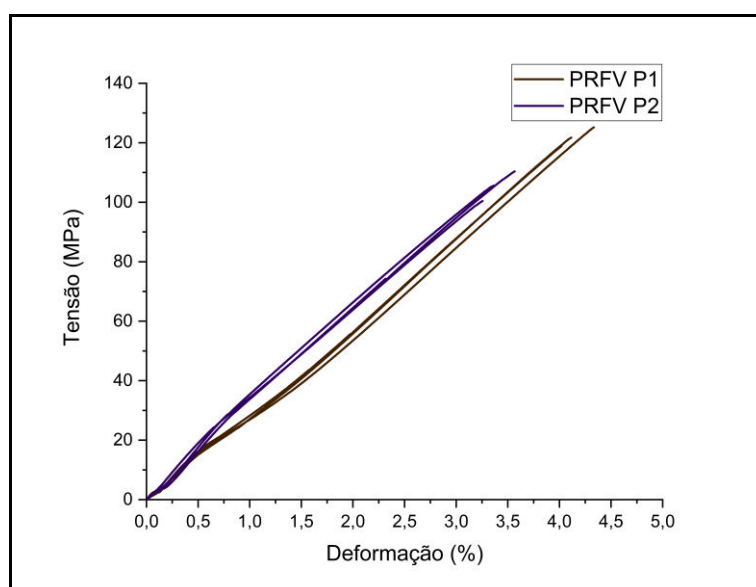
5.5.2 Ensaio de Tração para o PRFV + 1,5% EC.

O quinto teste realizado por tração foi em corpos de prova que receberam a adição de 1,5% de cinzas de *Eichhornia crassipes* à sua composição. Os resultados obtidos estão ilustrados no gráfico da Figura 26, enquanto a Tabela 12 apresenta os valores médios e os

desvios padrão para a tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade, conforme observado durante o experimento.

A Tabela 12 apresenta os valores médios para o PRFV com adição de 1,5% de cinzas de *Eichhornia crassipes*, registrando uma tensão máxima de $113,69 \pm 9,76$ MPa, uma deformação de $3,77 \pm 0,44$ mm/mm e um módulo de elasticidade de $3,04 \pm 0,28$ GPa. Apesar da natureza manual do processo de laminação, o desvio padrão para a tensão máxima, de $\pm 9,76$ MPa, está dentro dos limites aceitáveis, indicando uma boa consistência no comportamento mecânico do material.

Figura 26 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV + 1,5% EC.



Fonte: Autoria própria (2024).

No estudo de Alves (2023), foram utilizadas 10 camadas de tecido de fibra de vidro com a adição de 1,5% de *Eichhornia crassipes*, obtendo valores de resistência à tração de $359,04 \pm 10,83$ MPa, deformação de $6,75 \pm 0,27\%$ e módulo de elasticidade de $5,09 \pm 0,10$ GPa. Embora o estudo de Alves (2023) não tenha demonstrado alterações significativas nas propriedades mecânicas com a adição da macrófita, o presente experimento revelou uma melhora nas propriedades quando comparadas ao PRFV puro.

A Figura 27 ilustra os valores médios de PRFV + 1,5% EC, com seus respectivos desvios padrão, comparando as placas P1 e P2 em termos de tensão máxima (Figura 27 A), deformação (Figura 27 B) e módulo de elasticidade (Figura 27 C). As diferenças percentuais entre as duas placas, calculadas pela Equação 5, foram de 15,62% para a tensão máxima, 22,71% para a deformação e 15,20% para o módulo de elasticidade. Fazendo uma análise do

valor médio em conjunto com o DP na Figura 27, para todas as propriedades, observa-se uma diferença significativa entre os valores.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV + 1,5% EC.

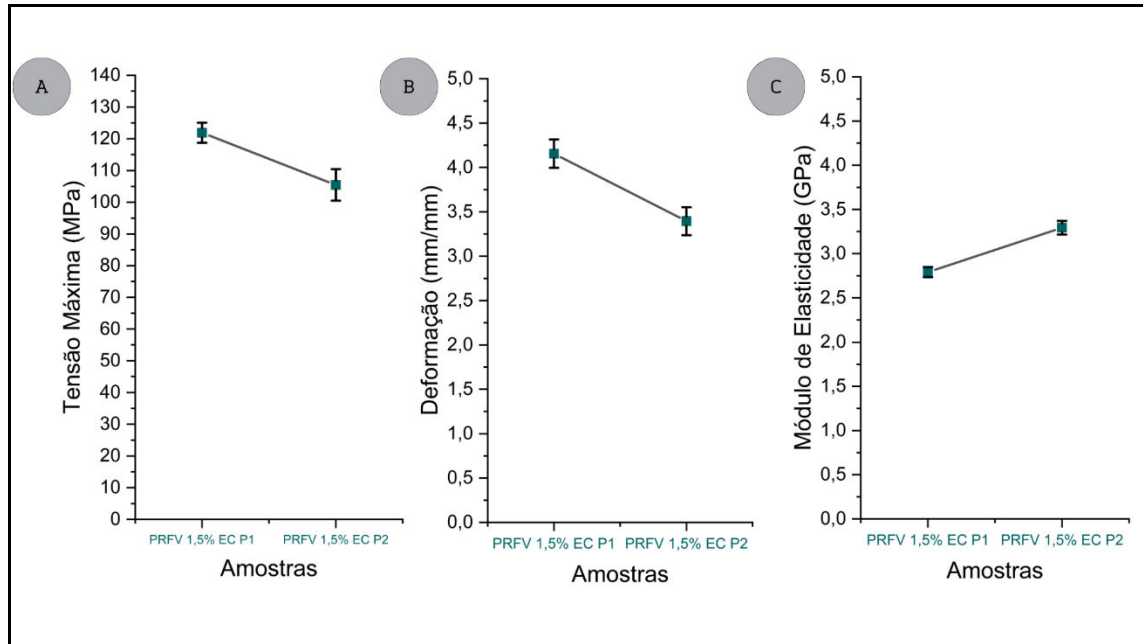
Placa	Tensão Máxima (MPa)		Deformação (mm/mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa	Valor por CP	Valor médio por placa
PRFV +1,5% EC P1	125,17		4,33		2,72	
	118,85	121,92 ±3,17	4,02	4,16 ±0,16	2,83	2,79 ±0,06
	121,75		4,12		2,82	
PRFV +1,5% EC P2	100,42		3,26		3,25	
	105,58	105,45 ±4,96	3,36	3,39 ±0,16	3,38	3,29 ±0,08
	110,35		3,57		3,25	
Valor Médio Total	113,69 ± 9,76		3,77 ± 0,44		3,04 ± 0,28	

Fonte: Autoria própria (2024).

A maior variação foi observada na deformação, mas todas as diferenças percentuais são consideráveis. Essas variações podem ser atribuídas a possíveis erros no processo de laminação, como a formação de um número maior de bolhas em uma das placas ou erros no cálculo da quantidade de cinzas em relação à massa de resina poliéster. No entanto, os resultados do ensaio de densidade (Tabela 11) indicam que as composições das placas são semelhantes, o que reduz a probabilidade de grandes variações nos constituintes do material.

De acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM D3039 (2017), foi conduzida uma inspeção visual das fraturas ocorridas nos corpos de prova de PRFV com 1,5% de adição de *Eichhornia crassipes*. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 4. As fraturas foram observadas na região útil dos corpos de prova, confirmando a adequação do material utilizado e garantindo a confiabilidade dos dados experimentais obtidos. Na Figura 28, é ilustrado um tipo de fratura (Quadro 1) identificada nos corpos de prova, classificada como LGM.

Figura 27 - Valores da tensão máxima (A), deformação (B) e módulo de elasticidade (C) média com desvio padrão do PRFV + 1,5% EC.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 28 - Ruptura dos corpos de prova de PRFV + 1,5% EC após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.6 Comparação entre as propriedades do PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS

Este tópico aborda as análises realizadas entre as propriedades mecânicas das placas laminadas com as diferentes composições da macrófita aquática *Pistia stratiotes*, as quais são

tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade. Utilizou-se, a Equação 5 para determinar a diferença percentual entre os valores entre as placas.

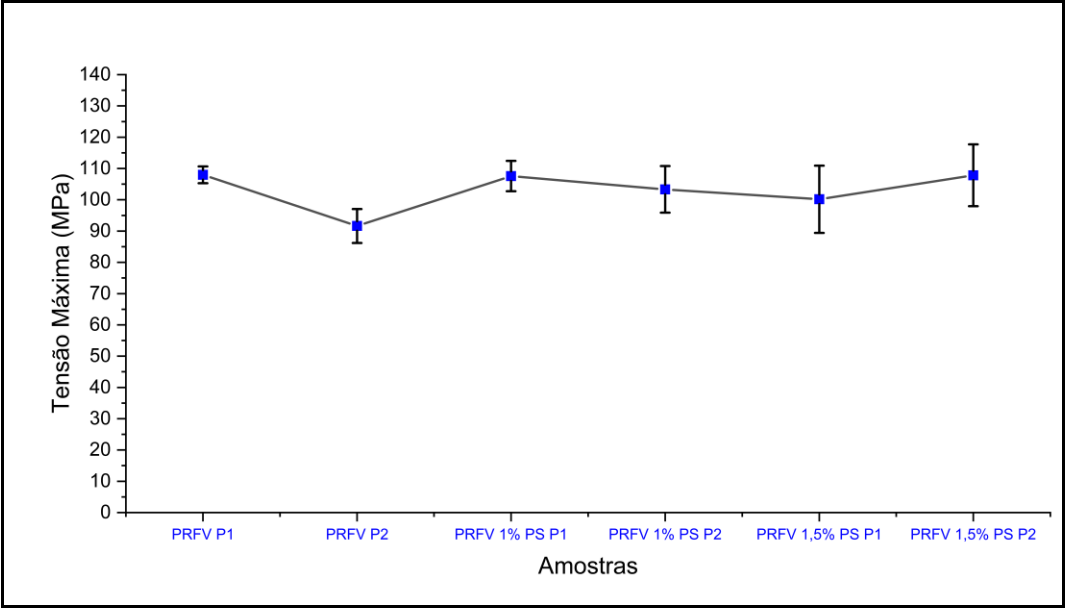
A incorporação de 1,0% de *Pistia stratiotes* (PS) ao PRFV resultou em um aumento discreto na tensão máxima em comparação ao PRFV puro, sugerindo uma leve melhoria na resistência à tração. Observa-se que a diferença percentual entre o PRFV P2 e o PRFV + 1,0% PS P1 é de 17,43%, isso mostra que um aumento de sua propriedade. No entanto, ao avaliar os respectivos desvios padrão (Figura 29), não é possível afirmar categoricamente que houve uma melhoria no material. Contudo, pode-se concluir que a adição de 1,0% de *Pistia stratiotes* não prejudicou as propriedades do compósito em relação ao PRFV puro.

A adição de 1,5% de *Pistia stratiotes* ao compósito apresentou uma tensão máxima praticamente equivalente à observada com 1,0% de PS (Figura 29). Ao analisar a variação entre o PRFV + 1,0% PS P1 e o PRFV + 1,5% PS P1 vê-se que foi de 7,41% confirmando que não houve uma diferença significativa. Em comparação com o PRFV puro, observou-se um pequeno incremento na tensão máxima, visto ao analisar o PRFV + 1,5% PS P2 com o PRFV P2 obtendo uma diferença percentual de 17,68%. Assim, os dados indicam que a incorporação de 1,5% de *Pistia stratiotes* também não afetou de maneira negativa as propriedades do compósito, em relação ao PRFV puro.

A adição de 1,0% de *Pistia stratiotes* (PS) ao PRFV mostrou-se praticamente igual em sua deformação em comparação ao PRFV puro, verificada através da comparação entre PRFV P1 e o PRFV + 1,0% PS P1 apresentando uma variação de 6,78% e que juntamente com os desvios padrão correspondentes (Figura 30), não é possível afirmar que houve uma melhora no material. Ainda assim, pode-se concluir que a adição de 1,0% de *Pistia stratiotes* não comprometeu essa propriedade em relação ao PRFV puro.

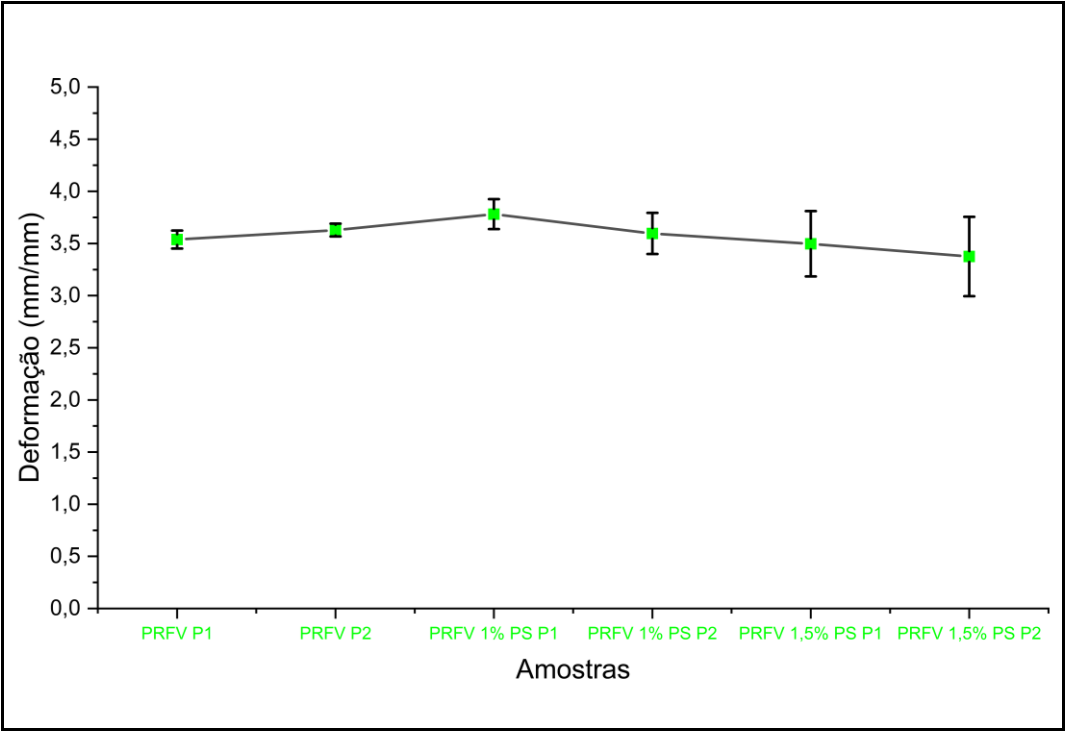
A adição de 1,5% de *Pistia stratiotes*, por sua vez, resultou em uma semelhança na deformação (Figura 30) em comparação ao compósito com 1,0% de PS, a diferença percentual de 11,83% entre o PRFV + 1,0% PS P1 e o PRFV + 1,5% PS P2 mostra isso. A mesma análise pode ser feita ao PRFV puro, pois com uma variação de 7,40% entre o PRFV + 1,5% PS P2 e o PRFV P2 pode-se considerar sem mudanças consideráveis na propriedade. Assim, tais variações podem ser consideradas pequenas para assegurar uma mudança considerável. Com base nesses resultados, conclui-se que a incorporação de 1,5% de *Pistia stratiotes* não afetou de forma significativa as propriedades do compósito em relação às demais composições.

Figura 29 - Análise da tensão máxima entre o PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 30 - Análise da deformação entre o PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

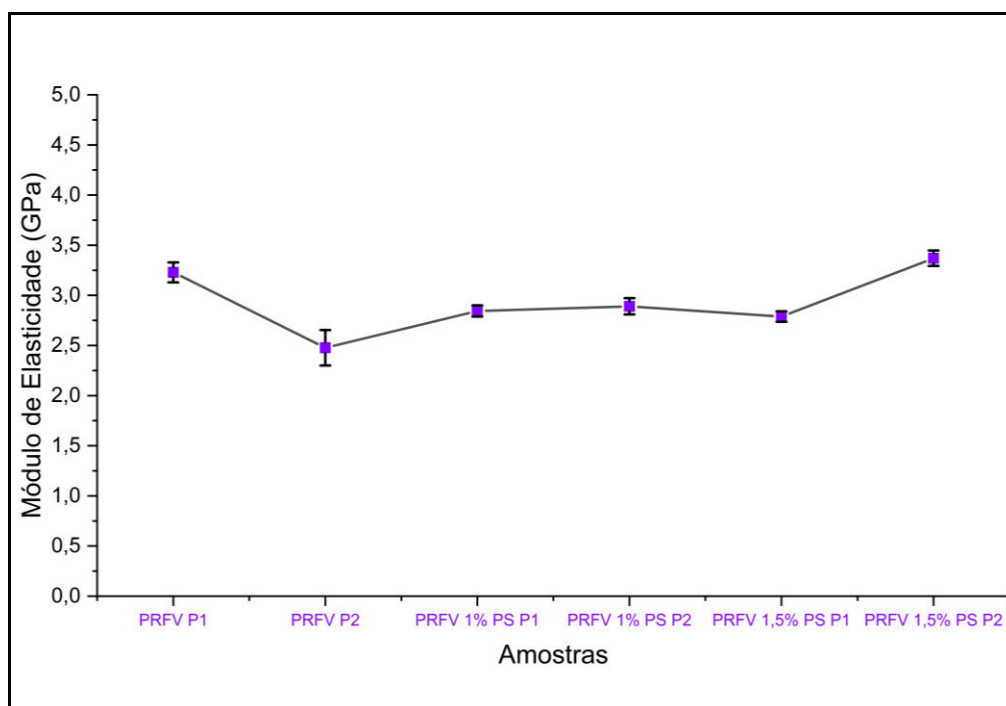
A adição de 1,0% de *Pistia stratiotes* (PS) ao PRFV manteve o módulo de elasticidade (Figura 31) praticamente inalterado em relação ao PRFV puro, com uma variação de 13,73%

entre o PRFV P1 e o PRFV + 1,0% PS P1. Apesar disso, é possível afirmar que a adição de 1,0% de PS não comprometeu essa característica quando comparada ao PRFV puro.

A incorporação de 1,5% de *Pistia stratiotes* resultou em um material mais rígido (Figura 31) em relação tanto ao compósito com 1,0% de PS que foi possível analisar comparando o PRFV + 1,0% PS P1 com o PRFV + 1,5% PS P2, o qual apresentou um valor de 18,66%, quanto ao PRFV puro, com variação de 35,89% ao fazer a diferença percentual entre o PRFV + 1,5% PS P2 e o PRFV P2. Logo, para essas variações, observa-se que a adição de 1,5% de *Pistia stratiotes* apresentou uma mudança no módulo de elasticidade, fazendo com que o material ficasse mais rígido.

Ao analisar o estudo de Clementino (2023) os resultados indicaram uma redução na resistência a tração do material, com a adição de 1,0% das cinzas da macrófita, sendo utilizado 10 camadas de tecido de fibra de vidro como reforço, o que contrasta com os resultados do presente estudo que utilizou apenas 3 camadas de manta de fibra de vidro como reforço, onde as propriedades do material foram mantidas mesmo com a inclusão da macrófita, com isso não afetando de forma negativa as propriedades do compósito. Destaca-se que o autor Clementino (2023) utilizou tecido (fibra de vidro contínua) e nesse trabalho foi realizado o estudo com manta (fibra de vidro picada).

Figura 31 - Análise do módulo de elasticidade entre o PRFV x PRFV + 1,0% PS x PRFV + 1,5% PS.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.7 Comparação entre as propriedades do PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC

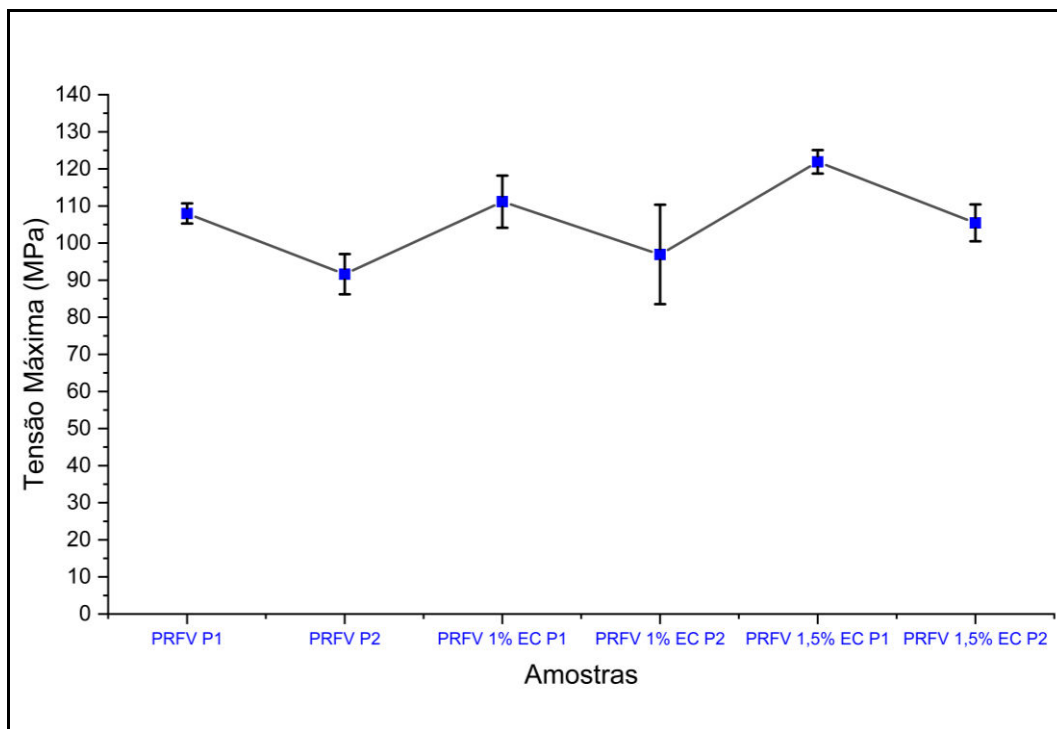
Neste tópico, são discutidas as análises realizadas sobre as propriedades mecânicas das placas laminadas, compostas por diferentes proporções da macrófita aquática *Eichhornia crassipes*. As propriedades examinadas incluem tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade. A Equação 5 foi utilizada para calcular a variação percentual entre os valores dessas propriedades.

Adição de 1,0% de cinzas de *Eichhornia crassipes* (EC) resultou em um aumento na tensão máxima em comparação ao PRFV puro (Figura 32), evidenciando uma na resistência à tração, com um incremento de aproximadamente 21,33% analisando o PRFV P2 com o PRFV + 1,0% EC P1. De maneira geral, a incorporação dessa quantidade de cinzas demonstrou um desempenho satisfatório, uma vez que não comprometeu as propriedades mecânicas do material e consequentemente elevou sua resistência a tração.

Já a adição de 1,5% de cinzas de *Eichhornia crassipes* proporcionou um aumento mais expressivo na tensão máxima, tanto em relação ao PRFV puro (33,07%) sendo feita a comparação entre PRFV + 1,5% EC P1 e o PRFV P2, quanto em comparação ao compósito com 1,0% de EC (25,78%), a qual sua diferença percentual foi realizada entre o PRFV + 1,5% EC P1 e o PRFV + 1,0% EC P2 (Figura 32). O desvio padrão obtido sugere que essa variação tem relevância considerável, permitindo concluir que a adição das cinzas contribuiu efetivamente para o aprimoramento da propriedade mecânica. Dessa forma, a incorporação de 1,5% de cinzas de *Eichhornia crassipes* mostrou-se vantajosa, pois não apenas preservou a resistência mecânica, como também promoveu melhorias relevantes na característica avaliada.

A incorporação de 1,0% de cinzas de *Eichhornia crassipes* (EC) resultou em uma semelhança na deformação em comparação ao PRFV puro (Figura 33), apresentando uma variação de 6,14% entre o PRFV P2 e o PRFV + 1,0% EC P2. No entanto, a adição dessa macrófita aquática não comprometeu a propriedade no material analisado.

Figura 32 - Análise da tensão máxima entre o PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC.

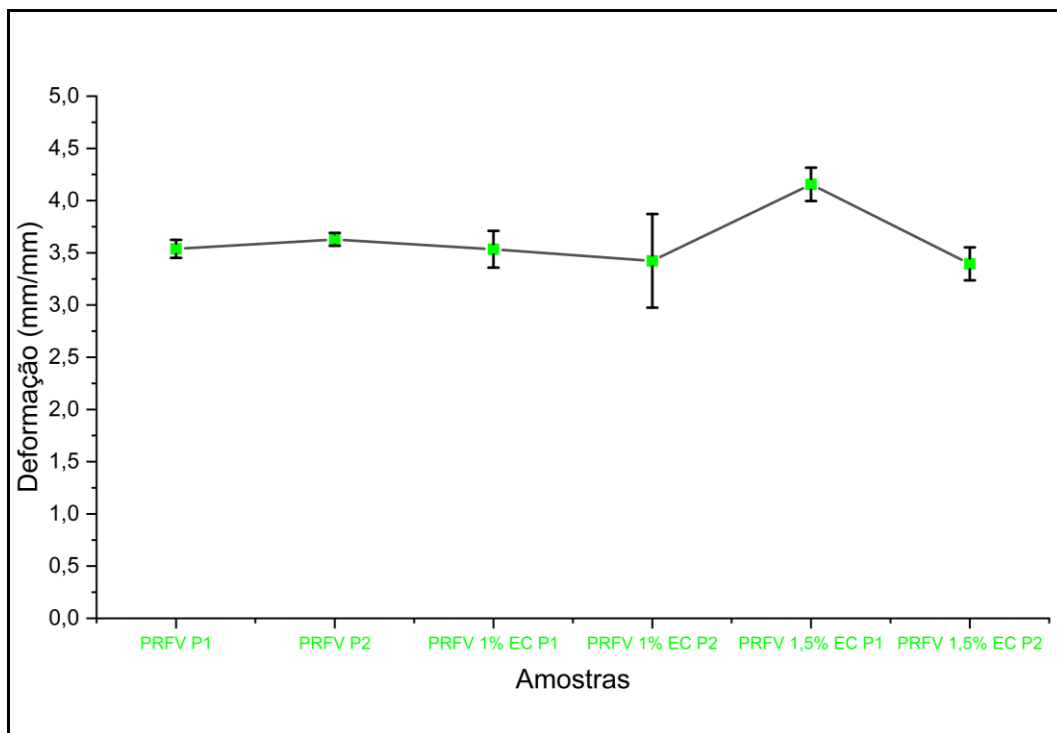


Fonte: Autoria própria (2024).

Por outro lado, a adição de 1,5% de cinzas de *Eichhornia crassipes* levou a um aumento na deformação em relação ao PRFV puro com uma diferença percentual de 17,51% entre o PRFV P1 e o PRFV + 1,5% EC P1, e em comparação ao compósito contendo 1,0% de EC (Figura 33) com uma variação entre o PRFV + 1,5% EC P1 e o PRFV + 1,0% EC P2 de 21,64%. Embora o desvio padrão indique que essas variações não foram tão expressivas, conclui-se que a adição das cinzas não prejudicou a deformação do compósito laminado, mantendo as propriedades para sua aplicação e podendo ser considerado até um acréscimo relevante.

A adição de 1,0% de cinzas de *Eichhornia crassipes* (EC) resultou em um aumento no módulo de elasticidade em relação ao PRFV puro (Figura 34), com uma variação percentual de 29,84% entre o PRFV P2 e o PRFV + 1,0% EC P1. Com isso, ao se considerar o desvio padrão dessa incorporação, observa-se que a propriedade mecânica do material apresentou uma elevação de sua rigidez.

Figura 33 - Análise da deformação entre o PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC.



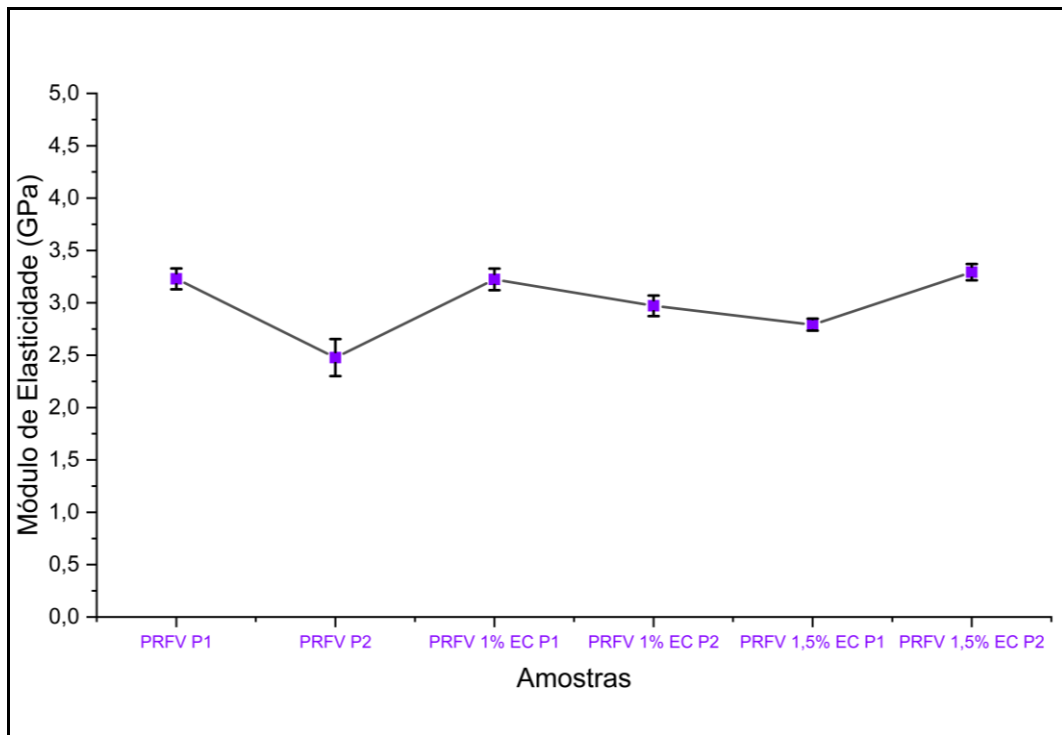
Fonte: Autoria própria (2024).

A inclusão de 1,5% de cinzas de *Eichhornia crassipes* também elevou o módulo de elasticidade em comparação ao PRFV puro, analisando a variação entre o PRFV + 1,5% EC P2 e o PRFV P2 observa-se que o resultado foi de 32,66%. Entretanto, em relação ao compósito com 1,0% de EC, houve uma leve redução, com uma variação de 15,41% entre o PRFV + 1,5% EC P1 e o PRFV + 1,0% EC P1 (Figura 34). O desvio padrão indica que essa diferença foi pouco significativa, pois se levar em consideração a verificação da diferença percentual entre o PRFV + 1,0% EC P2 e o PRFV + 1,5% EC P2 encontra-se um valor de 10,77%, o qual mostra uma certa similaridade entre os dados do módulo de elasticidade, permitindo observar que a adição das cinzas não afetou negativamente a propriedade mecânica avaliada no compósito laminado.

Analisando o trabalho de Alves (2023), o qual utilizou 10 camadas de tecido de fibra de vidro observa-se que em termos gerais, os resultados deste trabalho foram satisfatórios e alinharam-se com o esperado, visto que foi realizado com o reforço de apenas 3 camadas de manta de fibra de vidro. Alves (2023) relatou que o uso das cinzas da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* na concentração de 1,5% é uma opção viável como reforço na produção de um compósito de resina poliéster com fibra de vidro, para os parâmetros analisados. Além de não comprometer as propriedades mecânicas, essa abordagem possibilita o fechamento do

ciclo de recuperação ambiental ao empregar a biomassa produzida de forma sustentável, evitando que os poluentes absorvidos pela fitorremediação retornem ao ambiente aquático, mostrando as mesmas características apresentadas no presente trabalho e confirmando a viabilidade de seu uso.

Figura 34 - Análise do módulo de elasticidade entre o PRFV x PRFV + 1,0% EC x PRFV + 1,5% EC.



Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do estudo foi desenvolvido um material de utilidade para a engenharia através da incorporação de cinzas de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*, o que permitiu fechar o ciclo de fitorremediação, uma vez que a poluição absorvida pelas plantas inicialmente passa a ser incorporada no material final. Por meio do ensaio de densidade volumétrica e tração uniaxial realizado nos corpos de prova, foi possível analisar as principais propriedades mecânicas do material, como a tensão máxima, deformação e o módulo de elasticidade, além de avaliar o impacto da quantidade de cinzas das macrófitas aquáticas nos compósitos.

➤ Desempenho do Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV):

- O PRFV puro apresentou valores médios de densidade de $1,3911 \pm 0,0267$ g/cm³, e de resistência à tração de $99,81 \pm 9,75$ MPa, evidenciando boa homogeneidade e consistência do material. A comparação com estudos anteriores demonstrou que os valores obtidos são coerentes com a literatura, reforçando a confiabilidade do processo de fabricação.

➤ Influência da adição de *Pistia stratiotes*:

- A incorporação de 1,0% de PS resultou em um aumento discreto na tensão máxima ($105,46 \pm 6,08$ MPa) em comparação ao PRFV puro, sem comprometer a deformação ou o módulo de elasticidade.
- Com a adição de 1,5% de PS, a densidade e a resistência mecânica permaneceram estáveis, sugerindo que essa proporção não impactou negativamente as propriedades do material.
- Em ambos os casos, a presença da macrófita não alterou as propriedades mecânicas, o que indica potencial para uso como aditivo no PRFV.

➤ Efeitos da adição de *Eichhornia crassipes*:

- A adição de 1,0% de EC levou a um aumento na resistência à tração ($104,05 \pm 12,34$ MPa) em comparação com o PRFV puro, mostrando melhoria na resistência do material.
- Com 1,5% de EC, houve um aumento mais expressivo nas propriedades de tensão máxima e módulo de elasticidade, indicando que essa concentração pode ser mais eficiente para melhorar a rigidez do material.
- O uso de EC como reforço demonstrou ser eficaz para aprimorar as propriedades mecânicas do PRFV, especialmente em maiores concentrações.

➤ Variação nas propriedades mecânicas:

- As variações encontradas nos ensaios de densidade e tração podem ser atribuídas ao processo de fabricação manual, que é suscetível a inconsistências como bolhas e diferenças no tempo de cura.
- Apesar dessas variações, os resultados se mantiveram dentro de uma faixa aceitável, indicando que os métodos de laminação empregados foram eficazes para a obtenção de compósitos homogêneos.

A incorporação de cinzas naturais como *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* no PRFV se mostrou promissora, mantendo as propriedades mecânicas do material e não afetando negativamente em sua composição, além de remover poluentes do meio ambiente, com potencial para aplicações em diversos setores. Esses resultados sugerem que a utilização de materiais sustentáveis e de baixo custo é uma alternativa viável para o desenvolvimento de compósitos reforçados, contribuindo para soluções mais ecológicas na indústria de materiais compósitos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Thieres Santos; FABRICANTE, Juliano Ricardo. MACRÓFITAS AQUÁTICAS DO PARQUE NACIONAL SERRA DE ITABAIANA, SERGIPE, BRASIL. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2021.

<http://dx.doi.org/10.18316/rca.v15i.7538>.

ALVES, Gustavo de Brito. **Análise da viabilidade da adição de cinza de Eichhornia crassipes em PRFV**. 2023. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas-RN, 2023.

ASTM D3039 – 00. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D792 – 08. **Standard test method for density and specific gravity (Relative Density) of plastics by displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

ASTM D3878 – 07: **Standard Terminology for Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

BATISTA, A. C. M. C. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS HÍBRIDOS: ESTUDOS EXPERIMENTAIS, ANALÍTICOS E NUMÉRICOS**. 2017. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal.

BORSIĆ, Igor; RUBINIĆ, Tomica. First record of *Pistia stratiotes* L. (Araceae) in Croatia, with the consideration of possible introduction pathways. **Periodicum Biologorum**, v. 123, n. 1-2, p. 35-39, 2021. <http://dx.doi.org/10.18054/pb.v123i1-2.7674>.

BRAND, Mariana; LANDESMANN, Alexandre; MARTINS, Andre; CAMOTIM, Dinar. Estabilidade e Resistência de Colunas em Perfis U Pultrudados Reforçados com Fibra de Vidro sob Falha Global. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 19, n. 2, p. 1-16, 2022. <http://dx.doi.org/10535/rsae.v19i2.13410>.

BRITO JÚNIOR, Carlos Alberto Rios; PARDINI, Luis Claudio; ANCELOTTI JÚNIOR, Antônio Carlos. Obtenção das constantes elásticas efetivas sob condição dinâmica de um laminado híbrido para uso aeronáutico. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, p. 1-9, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1123>.

BRITO, Matheus Thomas de Oliveira; NASCIMENTO NETO, Paulo Francisco do; FRANÇA, Rafaela Jordânia Marinho; TINÔ, Sérgio Renan Lopes; FONTES, Raphael Siqueira; BATISTA, Ana Claudia de Melo Caldas. Influence on mechanical properties with the addition of limestone powder in polyester/fiberglass composite. **Journal Of Composite Materials**, v. 57, n. 12, p. 1989-1998, 2023. <http://dx.doi.org/10.1177/00219983231167215>.

BRUNO, Celestino. Avaliação de Cascas de Avelã na Produção de Compósitos Poliméricos à Base de Polipropileno. **International Journal Of Science And Society**, v. 4, n. 3, p. 179-184, 2022. <https://doi.org/10.54783/ijssoc.v4i3.511>.

CLEMENTINO, Hermano da Nóbrega. **Influência da adição de cinzas de Pistia stratiotes nas propriedades mecânicas do PRFV**. 2023. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas - RN, 2023.

COELHO NETO, Miguel Gomes; SOUZA, Luciane Lopes de. ESTUDO PRELIMINAR DA COMPOSIÇÃO, RIQUEZA E SIMILARIDADE DE COMUNIDADES DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS (TONANTINS, AMAZONAS). **Holos Environment**, v. 22, n. 1, p. 65-77, 2022. <https://doi.org/10.14295/holos.v22i1.12469>.

COLLING, Arthur Henrique Knorst; KORF, Eduardo Pavan; VANZETTO, Suelen Cristina; TOCHETTO, Gabriel André. Incorporação de PRFV em pavimentos intertravados: uma solução ecológica para resíduos industriais. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 1, p. 157-169, 2023. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000100655>.

COSTA, GIOVANNI BARBOSA DA; CARLOS, Glória Maria Leite; BATISTA, Ana Claudia de Melo Caldas. **PRORIEDADES MECÂNICAS EM LÂMINAS DE COMPÓSITOS COM TECIDOS SINTÉTICOS E HÍBRIDOS À $\pm 45^\circ$** . In: Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Anais...São Paulo(SP) CREA-SP, 2022. <https://doi.org/10.29327/xxiiconemi.572738>.

DÖLLE, K.; WANG, Q.; TONG, J.. Water Hyacinths (*Eichhornia crassipes*) – Application for Secondary Wastewater Treatment and Biomass Production. **Journal Of Advances In Biology & Biotechnology**, v. 24, n. 1, p. 52-61, 2021.

<https://doi.org/10.9734/jabb/2021/v24i130196>.

FREITAS, F. B. A., **Estudo da viabilidade na utilização de cinzas de macrófitas aquáticas em compósitos poliméricos particulados**. 2018, 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Mecânico) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2018.

FARES, Ana Luísa Biondi; SOUSA, Raimundo Luiz Moraes de; GURGEL, Ely Simone Cajueiro; GIL, André dos Santos Bragança; SILVA, Carlos Alberto Santos da; MICHELAN, Thaísa Sala. Diversity of macrophytes in the Amazon deforestation arc: information on their distribution, life-forms and habits. **Rodriguésia**, v. 72, n. 1, p. 1-9, 2020.

<http://dx.doi.org/10.1590/2175-7860202172117>.

FERNANDES, Iara Janaína., SANTOS, Ramon Vieira., SANTOS, Emanuele Caroline Araujo dos., ROCHA, Tatiana Louise Avila Campos., DOMINGUES JUNIOR, Nei Sebastião., MORAES, Carlos Alberto Mendes. Replacement of Commercial Silica by Rice Husk Ash in Epoxy Composites: **A Comparative Analysis. Materials Research**, v. 21, n. 3, p. 1-10, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0562>.

MANICKARAJ, K; Ramamoorthi, R; Sathish, S; Makeshkumar, M. Effect of hybridization of novel African teff and snake grass fibers reinforced epoxy composites with bio castor seed shell filler: experimental investigation. **Polymers And Polymer Composites**, v. 30, p. 1-11, 2022. <http://dx.doi.org/10.1177/09673911221102288>.

LEKAMGE, M.L.Dilakshi; WIJEYARATNE, M.J.s.; DAHANAYAKA, D.D.G.L.. Water quality parameters contributing to the invasion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in the Anawilundawa reservoir in Sri Lanka. **Sri Lanka Journal Of Aquatic Sciences**, v. 25, n. 1, p. 9-17, 2020. <http://doi.org/10.4038/sljas.v25i1.7572>.

LIMA, Moisés Medeiros de. **VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LÂMINAS POLIMÉRICAS HÍBRIDAS COM FIBRAS SINTÉTICAS**. 2022. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas-RN, 2022.

MATOS, Gabriane da Silva; CRUZ, Jefferson da; LIMA, Renato Abreu. A UTILIZAÇÃO DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS PELAS POPULAÇÕES TRADICIONAIS DO ALTO SOLIMÕES, AMAZONAS. **Novos Cadernos Naea**, v. 26, n. 3, p. 257-280, 2023.

<http://dx.doi.org/10.18542/ncn.v26i3.14325>.

MOUSTAFA, Hesham; YOUSSEF, Ahmed M.; DARWISH, Nabila A.; ABOU-KANDIL, Ahmed I.. Eco-friendly polymer composites for green packaging: future vision and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 172, n. 1, p. 16-25, 2019. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.048>.

NÓBREGA, João Victor Sales da; LIMA, Antonio Gilson Barbosa de; MELO, João Baptista da Costa Agra de; CARMONA, Charles Ulises de Montreuil; CABRAL NETO, João Pinto. Estudo da absorção de água em compósitos com fibras vegetais: uma prática de gestão ambiental. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 9, p. 294-310, 2021.

<http://dx.doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.009.0023>.

NTAKIYIRUTA, Pierre; BRITON, Bi Gouessé Henri; NSAVYIMANA, Gaston; ADOUBY, Kopoin; NAHIMANA, David; NTAKIMAZI, Gaspard; REINERT, Laurence. Optimization of the phytoremediation conditions of wastewater in post-treatment by *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*: kinetic model for pollutants removal. **Environmental Technology**, v. 43, n. 12, p. 1805-1818, 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2020.1852445>.

PAULA, Edgley Alves de Oliveira; MENDES, Rafael Bezerra Azevedo; COSTA, Claudia Yanara Meira da; MELO, Rafael Rodolfo de; PIMENTA, Alexandre Santos; OLIVEIRA, Ramona Rodrigues Amaro de; SOUZA, Joana Alice Galdino de. MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A POLYESTER MATRIX COMPOSITE REINFORCED WITH NATURAL FIBERS FROM *Luffa cylindrica* Hoen. **Nativa**, v. 9, n. 5, p. 558-562, 2021. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i5.12830>.

PRABAWARDANI, Saraswati; TABERIMA, Sartji; FATONI, Samsul; MAWIKERE, Nouke Lenda; FENETIRUMA, Obadja Andris; LYONS, Graham. The use of *Pistia stratiotes* compost as an ameliorant for chili growth and yields in the reclamation fresh tailing area of Timika, Papua. **Journal Of Degraded And Mining Lands Management**, v. 11, n. 2, p. 5329-5338, 2024. <http://dx.doi.org/10.15243/jdmlm.2024.112.5329>.

PRIYA, R.; JEYANTHI, K.A.. Phytochemical Composition and Proximate Analysis of the Medicinal Plant *Eichhornia crassipes* L. **International Journal Of Zoological Investigations**, v. 9, n. 1, p. 205-212, 2023. <https://doi.org/10.33745/ijzi.2023.v09i01.024>.

RATNA, Khabibatulloh Dewi Kaswari; SLAMET, Isworo. The Effectiveness of *Pistia stratiotes* as Phytoremediation Agents in Reducing Lead (Pb) Levels in Batik Household Industrial Wastewater in Bakaran Village, Central Java-Indonesia. **Asian Journal Of Biology**, v. 10, n. 4, p. 68-73, 2020. <https://doi.org/10.9734/ajob/2020/v10i430126>.

ROCHA, C. M. C.; LIMA, D.; CUNHA, M. C. C.; ALMEIDA, J. S.. Aquatic macrophytes and trophic interactions: a scientometric analyses and research perspectives. **Brazilian Journal Of Biology**, v. 79, n. 4, p. 617-624, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.185505>.

SANTOS, Alessandro José Gomes dos; FARIAS, Dorivane Cohen; SILVA, Nayla Gonçalves da; COSTA, Deibson Silva da. Determinação de propriedades mecânicas de tração de compósitos híbridos reforçados utilizando fibras de bambu tratadas em solução NaOH e lama vermelha. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 6, p. 2197-2204, 2021. <https://doi.org/10.34115/basrv5n6-010>.

SHEN, Jinxiang; HE, Ping; SUN, Xiaoli; SHEN, Zhanfeng; XU, Rong. Impact *Eichhornia crassipes* Cultivation on Water Quality in the Caohai Region of Dianchi Lake Using Multi-Temporal Sentinel-2 Images. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2260-2278, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15092260>.

SILVA, Amanda Albertin Xavier da. **COMPORTAMENTO MECÂNICO E BALÍSTICO DE LAMINADOS HÍBRIDOS DE ARAMIDA/VIDRO**. 2022. 66 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-Rs, 2022.

SILVA NETO, Valério Urbano da; PINO, Gilberto Garcia del; SETUBAL, Carlos Henrique dos Santos; BEZAZI, Abderrezak; RODRIGUES, Sávio Guilherme Azevedo; KIELING, Antonio Claudio; SANTOS, Marcos Dantas dos; TORRES, Aristides Rivera. Desenvolvimento de compósitos de resina epóxi com fibra vegetal de curauá sem tratamento químico. **Latin American Journal Of Development**, v. 4, n. 2, p. 343-357, 2022. <https://doi.org/10.46814/lajdv4n2-005>.

SOUZA, João Henrique Santos; ROCHA, Thomaz Osmane dos Santos; GOMES, Igor dos Santos; NASCIMENTO, Ailton da Silva; SILVA, Douglas Santos; NASCIMENTO, Ediléia da Silva; FUJIYAMA, Roberto Tetsuo. Composite materials of polyester matrix with hybrid reinforcement of jute fiber fabric and fiberglass blanket. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 1, p. 777-790, dez. 2018.

SOUZA, Neemias Silva de; FELIPE, Renata Carla Tavares dos Santos; FELIPE, Raimundo Nonato Barbosa; LIMA, Nathana Luíza Pinto de. Resíduos sólidos industriais: compósito com resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro. **Research, Society And Development**, v. 9, n. 9, p. 1-23, 29 ago. 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7136>.

SOUZA, Welinton Gustavo Moreira de; SILVA, Edson Lourenço da; PACHECO, Ana Carolina Landim; PINHEIRO, Tamaris Gimenez; ABREU, Maria Carolina de. RIQUEZA E DISTRIBUIÇÃO DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS NO RIO GUARIBAS, PICOS, PIAUÍ. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 29, n. 2, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.18764/1981-6421e2019.9>.

THIESEN JUNIOR, Anselmo. **ESTUDO COMPARATIVO DE LAMINADOS EM PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO OBTIDOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS SPRAY-UP E HAND LAY-UP**. 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville - SC, 2016.

TINÔ, Sérgio Renan Lopes; BATISTA, Ana Claudia de Melo Caldas; FONTES, Raphael Siqueira; AQUINO, Eve Maria Freire de. Compósitos poliméricos à base de tecidos bidirecionais naturais e sintéticos. **Latin American Journal Of Development**, v. 4, n. 3, p. 1270-1282, 2022. <https://doi.org/10.46814/lajdv4n3-047>.

WIBOWO, Yudha Gusti; NUGRAHA, Andhyka Tyaz; ROHMAN, Arif. Phytoremediation of several wastewater sources using Pistia stratiotes and Eichhornia crassipes in Indonesia. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 20, p. 1-9, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100781>.

YENTÜRK, İlknur; DIVARCI, Nur Sena Eyceyurt; ÖZTÜRK, Mustafa. Phytoremediation of nickel and chromium-containing industrial wastewaters by water lettuce (Pistia stratiotes). **International Journal Of Phytoremediation**, v. 25, n. 5, p. 550-561, 2022. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2092063>.