



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

Hermano da Nóbrega Clementino

Influência da adição de cinzas de *Pistia stratiotes* nas propriedades mecânicas do PRFV

CARAÚBAS

2023

Hermano da Nóbrega Clementino

Influência da adição de cinzas de *Pistia stratiotes* nas propriedades mecânicas do PRFV

Monografia apresentada à 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.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Freitas Freire Martins.

CARAÚBAS

2023

© 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.

C626i Clementino, Hermano da Nóbrega.
Influência da adição de cinzas de Pistia
stratiotes nas propriedades mecânicas do PRFV /
Hermano da Nóbrega Clementino. - 2023.
62 f. : il.

Orientadora: Ana Claudia de Melo Caldas
Batista.
Coorientador: Daniel Freitas Freire Martins.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2023.

1. reforço por dispersão. 2. fitorremediação. 3.
compósitos. I. Batista, Ana Claudia de Melo
Caldas, orient. II. Martins, Daniel Freitas
Freire, co-orient. III. 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.

Hermano da Nóbrega Clementino

Influência da adição de cinzas de *Pistia stratiotes* nas propriedades mecânicas do PRFV

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

Defendida em: 11 /10/ 2023

BANCA EXAMINADORA

Ana Claudia de Melo Caldas Batista, Profa. Dr. (UFERSA)
Presidente

Daniel Freitas Freire Martins, Prof. Dr^a. (UFERSA)
Membro Examinador

Geovanna Paulina Dantas Maia, Profa. (UFERSA)
Membro Examinador

Rejane Ramos Dantas, Profa. Dr^a. (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

*Em memória da minha mãe, Maria Osmídia
Araújo da Nóbrega Clementino.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu quero agradecer a Deus por me permitir chegar até aqui, sem Ti eu nada sou, mas com Seu eterno amor e misericórdia me faz chegar a lugares altos.

A trajetória universitária não é fácil, é necessário muita luta e persistência, mas com a ajuda das pessoas que te amam tudo fica mais fácil. Quero agradecer a minha família, em especial a minha mãe que hoje é uma estrela no céu que brilha na minha vida quando tudo parece não ter saída, você nunca será esquecida no meu coração. Agradecer ao meu Pai que me ajudou a não desistir, seguir lutando até o final e me dando o suporte necessário até aqui! Agradeço aos meus avós que cuidam de mim até hoje, minha base, sou muito grato pela vida de vocês na minha vida!

Agradecer a minha namorada, Nicole, que me ajuda diariamente a dividir o peso das responsabilidades e me ajuda a ser uma pessoa melhor todos os dias, sou muito grato por te ter em minha vida.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram a tornar isso possível, foram muitos momentos incríveis com vocês, em especial aos meus colegas do Acceptor Aerodesign e a Engrenagem Jr, cada experiência com vocês vou levar para a toda minha vida.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dra. Ana Claudia de Melo Batista por ter aceitado esse desafio e me auxiliar nessa jornada onde sem sua ajuda isso não seria possível, o meu muito obrigado e respeito por essa profissional! Agradecer também ao meu coorientador Prof. Dr. Daniel Freitas Freire Martins por ajudar e me guiar neste trabalho.

Agradeço a Banca Examinadora por aceitar presenciar o meu trabalho, duas pessoas incríveis composta por minha orientadora do BCT Profa. Dra. Rejane Ramos Dantas e Geovanna Paulina Dantas Maia.

Agradeço a instituição UFERSA e a todos os servidores que me ajudaram nessa caminhada, obrigado pela oportunidade de estudar e me capacitar nessa universidade onde pude adquirir muitos aprendizados.

EPÍGRAFE

“Com grandes poderes, vêm grandes responsabilidades.”

Stan Lee

RESUMO

Na busca por materiais mais leves e eficientes, os compósitos são uma alternativa para suprir a necessidade de obter propriedades mecânicas similares e até melhores, porém, com peso reduzido em relação aos materiais comumente utilizados na indústria. A utilização dos compósitos com o auxílio de reforços (fibroso e/ou particulados) na matriz polimérica ajuda a atingir resultados desejados para determinada atuação do material. Nesse contexto, este trabalho apresentou a temática da viabilização do uso das cinzas da *Pistia stratiotes* em Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV), em que foi possível observar e analisar seus efeitos nas propriedades mecânicas do material. Essa planta apresenta um potencial fitorremediador, podendo ser utilizada para recuperar ambientes aquáticos poluídos, especialmente por metais pesados. No entanto, em lugares onde essa planta é uma invasora, sua capacidade de proliferação é rápida e pode formar densos tapetes sobre a água, afetando toda a biodiversidade presente no local. Assim, o objetivo desta pesquisa consistiu na utilização das cinzas dessa macrófita aquática, como forma de ajudar a reduzir os danos nos ambientes aquáticos onde essa planta é um potencial ameaça, e analisar sua influência nas propriedades mecânicas dos PRFV. Para a metodologia abordada, os testes ocorrem por meio de dois ensaios, sendo eles: ensaio de tração uniaxial e ensaio de densidade volumétrica. No ensaio de tração o material é submetido a uma força aplicada em direções opostas no corpo de prova causando o esticamento no material e com equipamentos de medição é possível analisar a força, deformação, tensão e módulo. No ensaio de densidade, as amostras são submetidas a secagem e esterilização, e são realizadas medições com duas condições sobre o material (amostra seca e submersa). Assim, pode-se calcular sua densidade volumétrica e seu desvio padrão. Após os resultados apresentados dos materiais, foi observado que a utilização das cinzas de *Pistia stratiotes* não proporcionou melhoras significativas nas propriedades mecânicas do material, porém ocasionou uma influência positiva para o início de carga de dano dos CP's e não afetou negativamente as características originais do mesmo. Isso garante que seu uso seja uma alternativa para remover essa macrófita desses locais e utilizá-las em PRFV, na forma de cinzas, pois sua utilização serve como um meio de retirar a planta que está no ciclo final de vida, garantindo que os poluentes absorvidos na planta não sejam depositados novamente no meio que estava inserida, reduzindo a poluição dos ambientes aquáticos.

Palavras-chave: reforço por dispersão; fitorremediação; compósitos.

ABSTRACT

Nowadays, with the search for lighter and more efficient materials, composites are an alternative to meet this need to obtain similar mechanical properties, however, with reduced weight in relation to materials commonly used in industry. The use of composites with the aid of reinforcements (fibrous and/or particles) in the polymeric matrix helps to achieve desired results for a given material's performance. In this context, this work presented the theme of enabling the use of *Pistia stratiotes* ash in Glass Fiber Reinforced Plastics (PRFV), where it was possible to observe and analyze its effects on the mechanical properties of the material. This plant has phytoremediation potential and can be used to recover polluted aquatic environments, especially by heavy metals. However, in places where this plant is an invasive, its ability to proliferate is rapid and can form dense mats over the water, affecting all biodiversity present in the location. Thus, the objective of this research was to use the ashes of this aquatic macrophyte as a way to help reduce damage in aquatic environments where this plant is a potential threat and to analyze its influence on the mechanical properties of FRP. For the methodology discussed, the tests occur through two tests, namely: uniaxial tensile test and volumetric density test. In the tensile test, the material is subjected to a force applied in opposite directions to the test piece, causing the material to stretch and with measuring equipment it is possible to analyze the force, deformation, tension, modulus. In the density test, the samples are subjected to drying and sterilization and measurements are carried out with two conditions on the material (dry and submerged sample), finally, calculating its volumetric density and its standard deviation. After comparing the materials, it was observed that the use of *Pistia stratiotes* ash did not present significant improvements in the mechanical properties of the material, however it caused a positive influence on the initiation of damage load of the CP's and did not negatively affect its original characteristics, ensuring that their use as an alternative to remove this macrophyte from these locations and use them in FRP, in ash format, they serve as a means of removing the plant that is in the final cycle of life, ensuring that the pollutants absorbed in the plant are not deposited again in the environment it was inserted in, reducing pollution of aquatic environments.

Keywords: dispersion reinforcement; phytoremediation; composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Pistia stratiotes</i>	19
Figura 2 – Laminação com resina poliéster.	22
Figura 3 – Classificação dos compósitos.	23
Figura 4 – Tecido de fibra de vidro.	24
Figura 5 - Processo <i>Hand Lay-Up</i>	25
Figura 6 - Esquematização do ensaio de tração uniaxial.	26
Figura 7 – Tipos de fraturas do ensaio de tração uniaxial.	27
Figura 8 - Fluxograma da metodologia.	28
Figura 9 - Cinzas de <i>Pistia stratiotes</i>	29
Figura 10 – a) Resina poliéster; b) Catalisador.	29
Figura 11 - Tecido fibra de vidro.	30
Figura 12 - Fluxograma do processo de coleta até a obtenção das cinzas de <i>Pistia stratiotes</i>	31
Figura 13 - <i>Pistia stratiotes</i> as margens do rio Apodi/Mossoró.	31
Figura 14 – Pesagem da matriz na balança de precisão	32
Figura 15 - Teste de cura das resinas.	33
Figura 16 - Composto de resinas escolhidas.	33
Figura 17 - Dimensão do tecido de fibra de vidro.	34
Figura 18 - Laminação <i>Hand Lay-Up</i>	35
Figura 19 - Fixação do molde na matriz polimérica.	35
Figura 20 - Matriz polimérica no estado termofixo.	36
Figura 21 - Dimensionamento do corpo de prova.	36
Figura 22 - Proporções para os CP's.	37
Figura 23 - Máquina utilizada para ensaio de tração.	38
Figura 24 - Marcação dos galgos nos corpos de prova.	39
Figura 25 - Corpo de prova no ensaio de tração com os limites no galgo.	39
Figura 26 - Fratura do corpo de prova dentro do galgo.	40
Figura 27 - Fraturas fora do limite – classificadas como não válidas.	40
Figura 28 – Exemplo dos dados fornecidos pela máquina após o ensaio.	41
Figura 29 – CP's preparados para o processo de secagem e esterilização.	42
Figura 30 - Ilustração dos CP's na estufa.	42
Figura 31 - Estufa de secagem e esterilização na estufa.	43
Figura 32 - Dessecador com os CP's no seu interior.	43

Figura 33 - CP's no processo de resfriamento no dessecador.	44
Figura 34 - Pesagem do CP (amostra seca) na balança de precisão.	44
Figura 35 - Pesagem do CP (massa submersa) na balança de precisão.....	45
Figura 36 - Registro dos dados obtidos pela pesagem na balança de precisão.	45
Figura 37 - Fratura no PRFV.....	49
Figura 38 - Fratura no PRFV + 0,5%	51
Figura 39 - Fratura no PRFV + 1,0%.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos termofixos e termoplásticos.....	21
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens da utilização da fibra de vidro.	24
Quadro 3 - Código de características do modo de falha.....	27
Quadro 4 - Descrição normativa dos CP's utilizados.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teor dos elementos que compõem a cinza de <i>Pistia Stratiotes</i>	32
Tabela 2 - Espessura média dos CP's.....	46
Tabela 3 - Dados da densidade volumétrica dos CP's.	47
Tabela 4 - Dados da deformação, tensão e módulo de elasticidade do PRFV	48
Tabela 5 - Dados de deformação, tensão e módulo de elasticidade do PRFV + 0,5%.....	50
Tabela 6 - Dados de deformação, tensão e módulo de elasticidade do PRFV 1,0%.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão x Deformação do PRFV.	48
Gráfico 2 - Tensão x Deformação PRFV + 0,5%.....	50
Gráfico 3 - Tensão x Deformação PRFV + 1,0%.....	52
Gráfico 4 - Comparativo entre a tensão última a tração do PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%.....	54
Gráfico 5 - Comparativo da deformação entre PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%.	55
Gráfico 6 - Comparativo do módulo de elasticidade entre PRFV, PRFV +0,5% e PRFV + 1,0%.....	56
Gráfico 7 - Início de carga de dano dos materiais.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CP's	Corpos de Prova
PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
PRFV + 0,5%	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro + 0,5 % de adição com cinzas de <i>Pistia stratiotes</i>
PRFV + 1,0%	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro + 1,0 % de adição com cinzas de <i>Pistia stratiotes</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 Macrófitas Aquáticas e Fitorremediação	19
3.2 Compósitos	20
3.2.1 Fase Matriz	20
3.2.1.1 Matrizes Poliméricas	21
3.2.1.2 Poliéster	22
3.2.2 Fase Reforço	22
3.2.2.1 Reforços com Fibras	23
3.2.2.1.1 Fibra de vidro	24
3.2.2.2 Reforços Particulados	24
3.2.3 Processo <i>Hand Lay-Up</i>	25
3.3 Ensaio de Tração	26
3.4 Análise dos Tipos de Fratura	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Materiais e equipamentos	29
4.2 Métodos	30
4.2.1 Processo da obtenção das cinzas da <i>Pistia stratiotes</i>	30
4.2.2 Confeção dos laminados e corpos de provas	32
4.2.3 Ensaio de Tração Uniaxial	37
4.2.4 Ensaio de Densidade Volumétrica	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 Espessura dos CP's	46
5.2 Densidade Volumétrica dos CP's	46
5.3 Ensaio de Tração Uniaxial	47
5.3.1 Caracterização mecânica do PRFV	48
5.3.2 Caracterização mecânica do PRFV + 0,5%	50
5.3.3 Caracterização mecânica do PRFV + 1,0%	52

5.4 Comparativo da influência na adição das cinzas <i>Pistia stratiotes</i>	54
5.4.1 Comparação entre tensão máxima do PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV +1,0%	54
5.4.2 Comparação entre a deformação do PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV +1,0%.....	55
5.4.3 Comparação entre o módulo de elasticidade do PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV +1,0%	55
5.4.4 Influência da adição das cinzas da <i>Pistia stratiotes</i> no Início da Carga de Dano	56
6. Conclusão	58
REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da produção em massa, é visto que a sustentabilidade ambiental deve ser levada como prioridade. A alta taxa de produção pode originar contaminações, como aponta Souza *et al.* (2018). Os autores citam que metais pesados são inseridos no ambiente por meio de diversas fontes, sendo elas: naturais, agrícolas, industriais, de efluentes domésticos, atmosféricas dentre outras. De acordo com Naz, R. *et al.* (2022), a alta taxa de metais pesados no meio ambiente pode causar vários problemas como: a contaminação da água e do solo, fitotoxicidade, degradação do solo e altos riscos à saúde humana. Nos ambientes aquáticos, segundo Manahan (2013), há uma preocupação recorrente em relação a sua segurança, já que a mesma é posta em risco devido ao contato com poluentes químicos. Odjegba e Fasidi (2004) afirmam que a maioria dos resíduos despejados no solo muitas vezes são transportados para corpos de água naturais devido ao escoamento da chuva, tornando o ecossistema aquático o maior receptor de contaminantes de fontes antropogênicas.

Contudo, uma das alternativas para a redução desse problema é a fitorremediação. Como aponta Khan *et al.* (2004), essa técnica é considerada como um processo natural capaz de realizar a recuperação de ambientes por meio da alta capacidade de absorção e concentração dos metais pesados nas diferentes partes das plantas, sendo recomendadas para serem cultivadas próximas a rios industriais.

Dentre as diversas espécies de plantas que podem ser utilizadas na fitorremediação, as macrófitas aquáticas se destacam em diversos estudos para o tratamento de ambientes aquáticos. A *Pistia stratiotes* também conhecida como “alface de água” se enquadra na categoria de macrófitas aquáticas. Segundo Coetzee *et al.* (2020), é uma espécie que pertence ao grupo das *Araceae*, tendo como origem na América do Sul e a única do seu grupo capaz de flutuar livremente em corpos d'água parados ou lentos.

O manejo da *Pistia stratiotes* precisa ser feito da maneira adequada para ser benéfico ao meio onde se encontra, uma vez que, de acordo com Coetzee *et al.* (2020), pode ocasionar um efeito de sombreamento no local acarretando numa má qualidade da água, reduzindo a produtividade do sistema e a biodiversidade aquática. Logo, uma utilização correta para essas plantas seria uma forma de remover do ambiente os poluentes absorvidos por elas e vale lembrar que as plantas apresentam um ciclo de vida. Surgindo a importância de removê-las do ambiente natural e ser depositada em locais adequados, pois se assim não for feito, elas irão morrer e se decompor, devolvendo para o ambiente todos os contaminantes que ela havia absorvido.

Desse modo, para encerrar o ciclo de poluição do meio, uma possibilidade seria a utilização das cinzas de *Pistia stratiotes* em materiais compósitos. Os compósitos são a combinação de pelo menos duas fases, sendo uma matriz e outra o reforço. O reforço pode ser na forma de fibra e/ou partícula, logo as cinzas da *Pistia stratiotes* poderiam atuar como um reforço particulado adicional em um Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), como forma de fixar os poluentes em um determinado material, impedindo que retorne ao ambiente natural.

Os PRFV são amplamente utilizados em diversos setores, Callister e Rethwisch (2021), destacam as principais aplicações: carrocerias de automóveis e cascos de barcos, tubulações de plástico, recipientes para armazenamento e pisos industriais. Os autores ainda ressaltam que cada vez mais os PRFV estão sendo utilizados com o objetivo de reduzir o peso dos veículos e aumentar a eficiência dos combustíveis.

Logo, pode-se avaliar uma alternativa da utilização das plantas que estão no final do ciclo de vida, e aproveitar como reforço particulado de compósitos utilizados em diversas aplicações, visando uma limpeza adequada de ambientes aquáticos poluídos.

Com base nessa problemática, esse trabalho compara os Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV) e o PRFV com a adição de um reforço particulado com as cinzas da *Pistia stratiotes*.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da adição das cinzas de macrófitas aquáticas do tipo *Pistia stratiotes* em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro e avaliar as suas propriedades mecânicas.

2.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar um laminado de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV);
- Confeccionar dois laminados de PRFV com a adição de cinzas de macrófitas aquáticas do tipo *Pistia stratiotes* nas proporções de 0,5 % e de 1 %;
- Realizar o ensaio de tração uniaxial e avaliar as propriedades mecânicas obtidas;
- Realizar o ensaio de densidade;
- Realizar um estudo comparativo das propriedades mecânicas para verificar sua viabilidade da adição de cinzas de macrófitas aquáticas do tipo *Pistia stratiotes* nas proporções de 0,5 % e de 1 %.

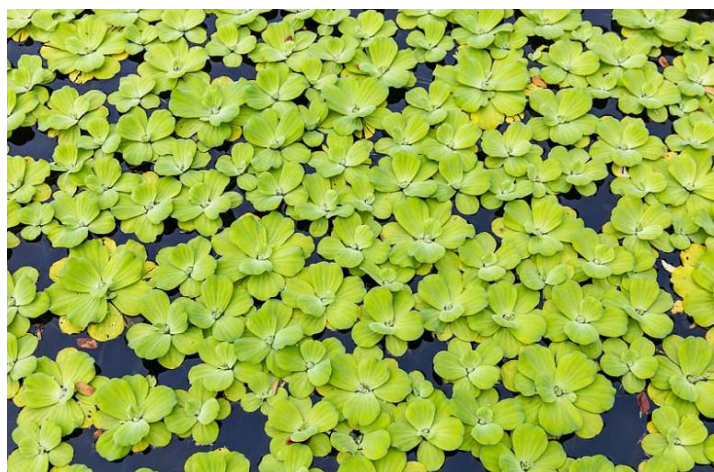
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Macrófitas Aquáticas e Fitorremediação

As macrófitas aquáticas, de acordo com Pompêo (2008), possuem uma grande importância na estrutura e dinâmica para os ambientes aquáticos. As macrófitas podem ser um indicador de nutrientes em regiões com alta proliferação dessa planta. De acordo com Santos (2020), em ambientes aquáticos que possuem uma alta presença de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e de luz solar, se caracteriza como local propício a proliferação dessas macrófitas.

Segundo Santos (2020), com o aumento expressivo da poluição causada pelas atividades antropogênicas, a fitorremediação é uma alternativa para o tratamento e limpeza do ambiente. Para Khan *et al.* (2004), a fitorremediação é um controle biológico e natural sendo utilizadas plantas para eliminar contaminantes do meio ambiente no qual estão inseridas. A *Pistia stratiotes* (Figura 1) faz parte do grupo das macrófitas aquáticas que possuem a capacidade de fitorremediar ambientes aquáticos.

Figura 1 - *Pistia stratiotes*.



Fonte: <https://www.gardenia.net/plant/pistia-stratiotes>.

A propagação das macrófitas, enfatizado por Coetzee *et al.* (2020), pode desregular a biodiversidade no local e sua produção devido ao efeito de sombreamento gerado pelos densos tapetes que se formam sobre a água. Para prevenir o acúmulo de matéria orgânica, a fitorremediação de acordo com Andrade *et al.* (2009), envolve o corte da parte aérea das plantas após seu crescimento, e a remoção para locais apropriados, como os aterros industriais. Isso assegura que a planta se decomponha em um local apropriado possibilitando seu uso como

reforço em compósitos, evitando assim qualquer impacto ambiental decorrente dos poluentes absorvidos durante o processo de fitorremediação.

3.2 Compósitos

De acordo com Callister e Rethwisch (2021), o conceito de compósitos para uma nova classe de materiais se deu na metade do século XX, com a fabricação de compósitos multifásicos como os polímeros reforçados com fibra de vidro, sendo reconhecida pelo conceito da combinação de diferentes materiais com uma grande variedade de propriedades que não são atendidas por nenhuma liga de metal ou material cerâmico.

Para Lorandi *et al.* (2016), os compósitos são estudados e desenvolvidos com a finalidade de obter o melhor desempenho, desde diminuir o peso final do produto até a melhoria de propriedades específicas em aplicações estruturais. Lopes (2017) recorda que a grande parte dos estudos relacionados aos compósitos são desenvolvidos e concentrados na melhoria das propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade.

Segundo Levy Neto e Pardini (2018), os compósitos têm como característica combinar normalmente, pelo menos, duas fases distintas, sendo: matriz e reforço. Desse modo, como aponta Ventura (2009), a classificação dos compósitos se dá de acordo com o tipo de material que irá formar a matriz, onde as propriedades dos compósitos irão depender das suas propriedades físicas e os fatores de fases seguintes, como as quantidades relativas e a geometria do reforço.

O incremento do uso dos compósitos como aponta Casaril (2009), vem crescendo em vários ramos da indústria, mediante o desenvolvimento das produções de insumos, como materiais fibrosos e particulados com diversas geometrias.

3.2.1 Fase Matriz

Segundo Callister e Rethwisch (2021), a fase matriz possui muitas funções, elas são capazes de: ligar as fibras umas às outras e atuar como o meio responsável pela distribuição da tensão aplicada para as fibras, proteger as fibras individuais contra danos superficiais e separar as fibras atuando como uma barreira, prevenindo a propagação de trincas de uma fibra para outra.

De acordo com Ventura (2009), a fase matriz pode ser um material metálico, polímero ou cerâmico, preenchendo os espaços vazios da estrutura do material compósito onde geralmente ficam no reforço, mantendo sua posição original.

3.2.1.1 Matrizes Poliméricas

Segundo Lopes (2017), os compósitos que possuem esse tipo de matriz são materiais obtidos na combinação de um polímero com um agente de reforço, onde o responsável pela melhoria nas propriedades mecânicas é a adição do reforço. Para Callister e Rethwisch (2021), “Esses materiais são usados na maior diversidade de aplicações dos compósitos, assim como nas maiores quantidades, como consequência das suas propriedades à temperatura ambiente, da facilidade de fabricação e do seu custo”.

Como aponta Matthew e Rawlings (1994, *apud* Lopes, 2017), as matrizes poliméricas são divididas em três classificações, sendo elas: termofixos, termoplásticos e elastômeros.

Smith (2012) descreve as classificações para os plásticos de termofixos e termoplásticos, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos termofixos e termoplásticos.

Termoplástico	Termofixo
Necessita de calor para tornar moldável e, após resfriado, retêm a forma na qual foram modelados.	Termofixos permanentes e curados por reações químicas não podem ser refundidos e remoldados em outras formas.
Podem ser aquecidos e moldados novamente em novas formas várias vezes.	Não podem ser reciclados pois se degradam quando submetidas a altas temperaturas.

Fonte: Adaptado pelo autor, de Smith (2012).

De acordo com Levy Neto e Pardini (2018), há um predomínio das matrizes poliméricas no mercado quando o assunto é a fabricação de componentes compósitos. Entre as termofixas, a resina de poliéster e a epóxi as mais utilizadas. Porém, uma dificuldade no uso das resinas com esse tipo de matriz é que após o endurecimento ela é irreversível e dificulta a reciclagem dos compósitos, dificuldade essa que pode ser contornada com as matrizes termoplásticas (Levy Neto e Pardini, 2018).

3.2.1.2 Poliéster

Castro (2003), as resinas de poliéster são classificadas em três tipos: a poliéster saturado, poliéster de ácidos insaturados e poliéster de álcoois insaturados, como componente.

Para Mafra (2018), a fabricação de peças utilizando resina poliéster com o auxílio de molde pode ser realizada com ou sem fibra de vidro (Figura 2), tendo sua matriz polimérica formulada com a adição de iniciadores e promotores de cura, ou comumente chamados de “catalisadores” e “aceleradores” respectivamente.

Figura 2 – Laminação com resina poliéster.



Fonte: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/laminando-com-resinas-poliester/>.

3.2.2 Fase Reforço

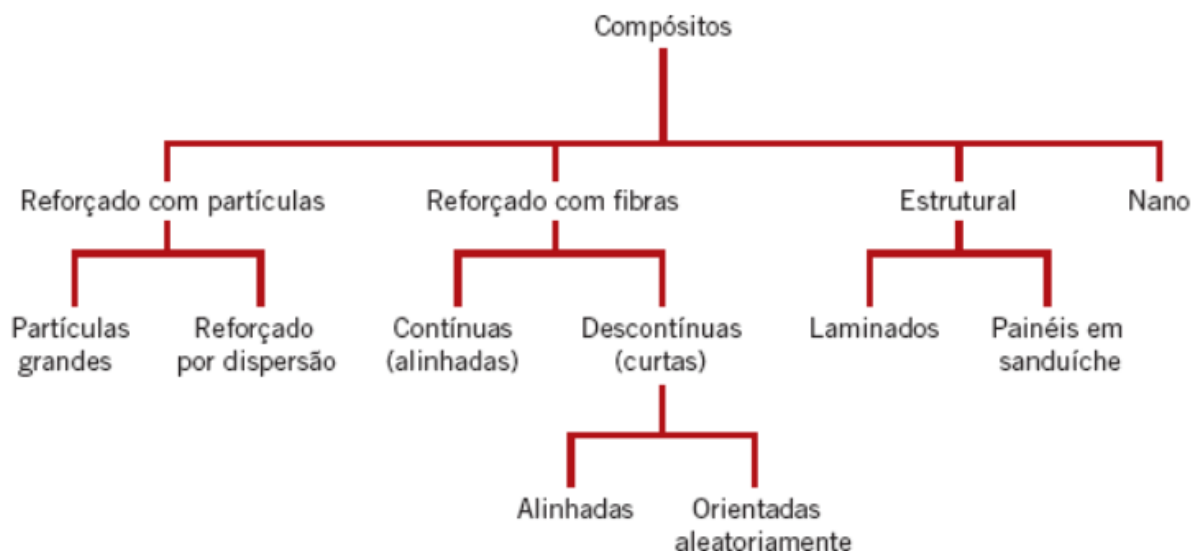
Callister e Rethwisch (2021), a fase reforço dos compósitos são classificadas em quatro divisões (Figura 3), sendo elas: reforço por partículas, reforço por fibras, estruturais e nano. Dentro dessas divisões, também existem as suas subclassificações:

- Reforçado com partículas: Partículas grandes e reforçado por dispersão;
- Reforçado com fibras: Contínuas (alinhadas) e descontínuas (curtas);
- Estrutural: Laminados e painéis sanduíche;
- Nano.

Segundo Callister e Rethwisch (2021), as partículas de reforço limitam a movimentação da fase matriz na vizinhança, transferindo uma parte da tensão nas partículas que suportam uma parcela da carga, o grau de reforço depende da ligação forte na interface matriz-partícula.

Consequentemente, com o auxílio do reforço, a matriz formada é capaz de transferir os esforços mecânicos de forma integrada (Batista, 2017).

Figura 3 – Classificação dos compósitos.



Fonte: Callister e Rethwisch (2021).

3.3.2.1 Reforços com Fibras

Para Ugural (2009), o reforço por fibras nos compósitos é obtido pelo envolvimento que podem ser contínuos ou não contínuos das fibras de um material mais forte e mais rígido em um material mais frágil de reforço ou matriz. De acordo com Lorandi *et al.* (2016), as fibras em compósitos contribuem em diferentes propriedades do material, tanto no desempenho como na resistência à tração e à fratura, além de uma ótima integridade e conformabilidade.

O motivo da utilização de materiais compósitos com fibras, para Casaril (2009), é que essa geometria é responsável por garantir uma melhor resistência e rigidez inerente maior que o material que não é fibroso. Segundo Callister e Rethwisch (2021), a fibra polimérica precisa atender as diversas propriedades físicas e químicas rigorosas, além de se submeter às deformações mecânicas.

“Dentre as diversas cargas que podem ser adicionadas à matriz polimérica para a obtenção de compósitos, as fibras estão entre as mais utilizadas, desde as sintéticas (por exemplo, fibra de vidro e de carbono) aos vegetais (por exemplo, fibra de juta, coco e de sisal)” (LORANDI *et al.*, 2016).

3.3.2.1.1 Fibra de vidro

Como aponta Callister e Rethwisch (2021), a fibra de vidro é a mais utilizada e conhecida, onde sua utilização se dá junto com um material polimérico epóxi ou poliéster. Possuindo pequenas fibras de vidro que encerram em um material polimérico, aliando a resistência e rigidez da fibra de vidro com a flexibilidade do polímero (normalmente poliéster ou epóxi). Para Levy Neto e Pardini (2018) a fibra de vidro possui muitas vantagens e desvantagens (Quadro 2), sendo elas:

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens da utilização da fibra de vidro.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo	Módulo de elasticidade baixa
Elevada resistência à tração	Auto abrasividade
Alta inércia química	Baixa resistência contra fadiga

Fonte: Adaptado pelo Autor, Levy Neto e Pardini (2018).

Lima (2022), as fibras de vidro são encontradas no mercado de diversas formas, sendo elas: fio Roving, mantas com fibras contínuas, curtas prensadas e em tecidos de diversas gramaturas. A Figura 4 está ilustrado o tipo de tecido de fibra de vidro.

Figura 4 – Tecido de fibra de vidro.



Fonte: Autoria própria.

3.3.2.2 Reforços Particulados

Melo (2013), descreve que o reforço por partículas é mais rígido que a matriz e há melhoria das propriedades mecânicas, dependendo da interação entre matriz e partícula. Os

materiais particulados, de acordo com Casaril (2009), são utilizados com a finalidade de modificar as propriedades, sendo elas: térmicas, dureza, superficial, atrito e desgaste. Desse modo, como aponta Nascimento (2020), os reforços particulados contribuem para o aumento das propriedades em todas as direções devido a dispersão que ocorre por toda a região da matriz. Para Casaril (2009), as partículas no material compósito auxiliam no aumento da rigidez, porém, não contribuem significativamente com o aumento da sua resistência.

3.2.3 Processo *Hand Lay-Up*

Para Elkington (2015), o processo *Hand Lay-Up* consiste na organização manual de camadas individuais ou de camadas com algum reforço, obtendo milhares de fibras com resina disposta em uma camada unidirecional. A sua organização dada pela sequência de camadas precisa estar com algum tipo de resina entre as fibras para obter a peça desejada após o tempo de cura da resina presente no material (Figura 5).

Figura 5 - Processo *Hand Lay-Up*.



Fonte: https://www.sulplast.com.br/pt_BR/tecnologia-e-processos/fibra-de-vidro/hlu.

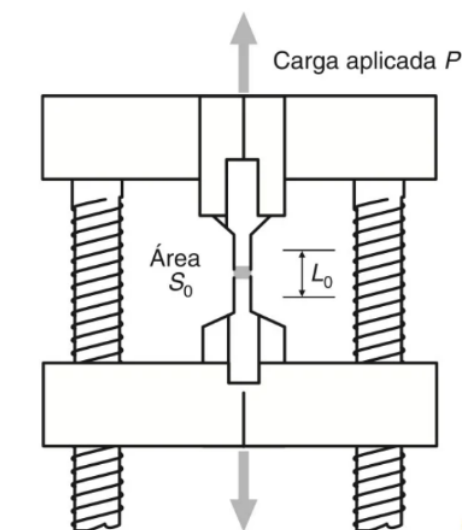
Desse modo, como aponta Elkington (2015), mediante esse processo é possível produzir peças complexas com elevada qualidade, baixo custo e versatilidade para novas peças e variações de design. Para Thiesen Junior (2016), uma vantagem que esse processo tem sobre os outros processos de laminação é seu custo inicial baixo, porém possui uma desvantagem em comparação com processos mais complexos, consiste em uma menor fração de reforço sobre a matriz, formando um laminado mais pesado.

3.3 Ensaio de Tração

De acordo com a Norma ASTM D3039 (*American Society for Testing and Materials*) (2017), esse tipo de ensaio é utilizado para materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibra, com a finalidade de gerar dados referentes às suas propriedades de tração dos materiais.

Para Garcia (2012), o ensaio de tração é muito utilizado na indústria de componentes mecânicos, no qual o teste consiste na aplicação de carga de tração uniaxial que estica o corpo de prova de forma crescente até o limite do material, causando a sua ruptura. É possível observar na Figura 6 como são realizados os esforços sobre o material.

Figura 6 - Esquematização do ensaio de tração uniaxial.

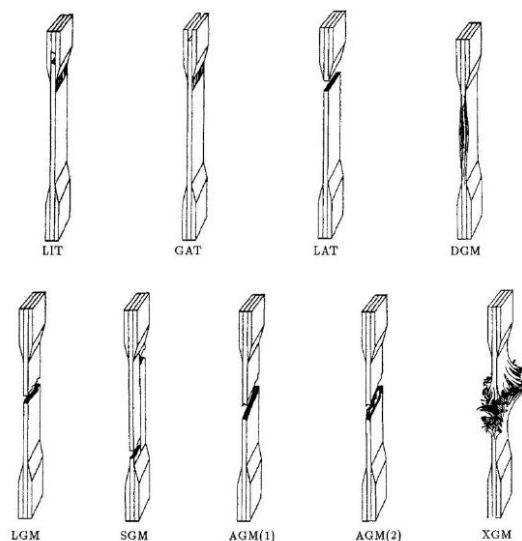


Fonte: Garcia (2012).

3.4 Análise dos Tipos de Fratura

A análise de fratura ocorre após o ensaio de tração, no qual o material sofre a ruptura após a sua resistência a ruptura ser ultrapassada. Para a norma ASTM D3039 (2017) é necessário registrar o local e definir o tipo de fratura de acordo com o código de modo de falha de três partes, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Tipos de fraturas do ensaio de tração uniaxial.



Fonte: ASTM D3039 (2017).

Para cada código, significa um tipo de fratura que ocorre no final do ensaio de tração uniaxial. No Quadro 3 é possível observar três componentes que correspondem aos caracteres do código do modo de falha, sendo eles: tipo de fratura, área de falha e localização da fratura.

Quadro 3 - Código de características do modo de falha.

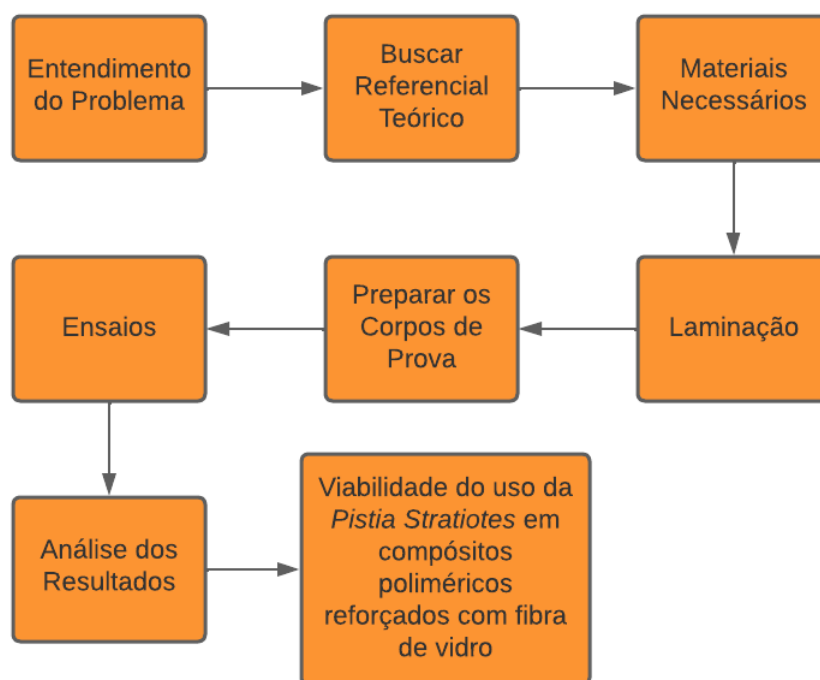
Código	Definição do Código (normativo)	Definição do código
LIT	<i>Lateral-Inside-Top</i>	Lateral dentro da lingueta da garra superior.
GAT	<i>Grip/Tab - at grip/tab - top</i>	Desaderência da lingueta na garra superior.
LAT	<i>Lateral - at grip – top</i>	Lateral na base da lingueta da garra superior
DGM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

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

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos realizados para a execução dessa pesquisa podem ser visualizados no fluxograma, com o passo a passo destacado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria.

O desenvolvimento deste trabalho consiste em avaliar a influência que a adição das cinzas de macrófitas aquáticas em PRFV operam sobre as propriedades mecânicas em relação somente aos PRFV, entendendo e buscando referenciais teóricos para a viabilização deste trabalho.

Para iniciar o processo desta pesquisa é necessário o entendimento prévio do problema, buscar o referencial teórico, adquirir os materiais necessários para a prática da pesquisa, em seguida eles foram laminados em forma de tiras, preparados os corpos de prova para a realização dos ensaios de tração uniaxial e de densidade volumétrica, análise dos resultados comparando com outras literaturas e verificar a viabilidade do uso das cinzas da *Pistia stratiotes* em PRFV.

Os ensaios desta pesquisa foram padronizados usando como referência a norma ASTM D3039 (2017) para ensaio de tração uniaxial e ASTM D792 (2008) para ensaio de densidade volumétrica. No ensaio de tração os compósitos foram submetidos a uma carga uniaxial até a

ruptura do material sendo possível analisar os resultados, determinar as propriedades mecânicas e a viabilidade do uso das cinzas da *Pistia stratiotes* em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro.

4.1 Materiais e equipamentos

No início deste estudo, optou-se por utilizar cinzas de *Pistia stratiotes* (conforme ilustrado na Figura 9) como reforço particulado em combinação com plástico reforçado com fibra de vidro, este material foi utilizado na composição da matriz polimérica.

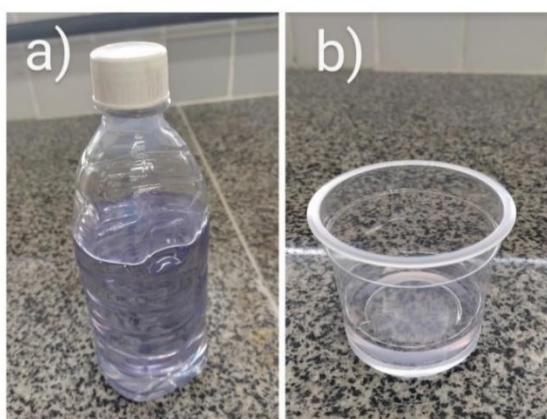
Figura 9 - Cinzas de *Pistia stratiotes*.



Fonte: Autoria própria.

A matriz utilizada para os testes desta pesquisa é a resina termofixa poliéster ortoftálica, no qual foi escolhida devido ao seu baixo custo e adaptabilidade à resistência contra umidade. Utilizou-se junto com a resina, o iniciador de cura (catalisador) para acelerar a reação de endurecimento do material, como pode ser visto na Figura 10.

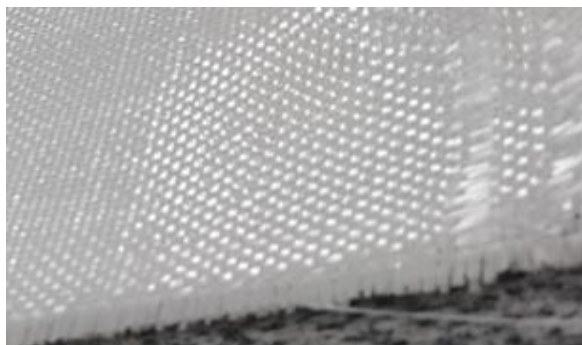
Figura 10 – a) Resina poliéster; b) Catalisador.



Fonte: Autoria própria.

O tecido de fibra de vidro-E bidirecional tipo tela 1x1 foi escolhida para a composição da matriz polimérica com o auxílio do poliéster, sua orientação bidirecional possui orientações 0° a 90° igualmente proporcional, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Tecido fibra de vidro.



Fonte: Autoria própria.

Para a realização da confecção dos laminados, laminação, ensaio de tração uniaxial e ensaio de densidade volumétrica, também foi utilizado os seguintes materiais e equipamentos:

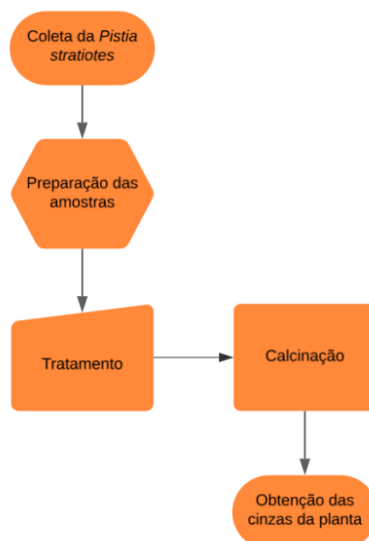
- Confecção dos laminados: Balança de precisão Shimadzu® TX323L;
- Laminação: Desmoldante Tec Glaze - N, dois moldes de vidro, rolo metálico;
- Preparação dos corpos de provas: Paquímetro universal 1205-150S INSIZE e micrômetro externo digital Digimess-571811
- Ensaio de tração uniaxial: EMIC® DL 10000;
- Ensaio de densidade volumétrica: Balança de precisão Shimadzu® AUY220, dessecador.

4.2 Métodos

4.2.1 Processo da obtenção das cinzas da *Pistia stratiotes*

Para o início dos testes, o objeto de estudo na matriz reforçada com fibra de vidro é as cinzas da *Pistia stratiotes*. Neste trabalho as cinzas já foram previamente adquiridas por Freitas (2018). No fluxograma da Figura 12 é possível visualizar os processos desde a preparação da coleta até a obtenção das cinzas da *Pistia stratiotes*.

Figura 12 - Fluxograma do processo de coleta até a obtenção das cinzas de *Pistia stratiotes*.



Fonte: Autoria própria

Segundo Freitas (2018), a planta foi coletada de forma aleatória nas margens do rio Apodi/Mossoró (Figura 13), e posteriormente armazenada em baldes e sacos plásticos. Em seguida as amostras da planta foram passadas por uma preparação e tratamento de limpeza para remoção de sujeira presente na planta.

Figura 13 - *Pistia stratiotes* as margens do rio Apodi/Mossoró.



Fonte: Freitas (2018).

Após o tratamento das plantas, foi retirada a umidade das amostras através da secagem e desidratadas em uma estufa na temperatura a 70° C e trituradas para redução do tamanho. Em seguida o material triturado foi colocado num forno tipo mufla para a obtenção das cinzas pelo processo de calcinação e resfriadas no dessecador (Freitas, 2018).

Freitas (2018) ainda fez a caracterização das cinzas de *Pistia stratiotes* (Tabela 1) pelo ensaio de Fluorescência de Raios – X e assim foi possível determinar os elementos no qual o material é constituído.

Tabela 1 - Teor dos elementos que compõem a cinza de *Pistia Stratiotes*.

Elemento	Porcentagem (%)	Elemento	Porcentagem (%)
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: Freitas (2018).

4.2.2 Confeção dos laminados e corpos de provas

Para a confecção dos laminados foi utilizado a resina pura e resina com adição das cinzas de *Pistia stratiotes*, ambas contendo resina poliéster e catalisador para formação das matrizes termofixas. O requisito que foi adotado na matriz foi da mistura resina, cinzas e catalisador se tornar termofixo em um período de aproximadamente 30 minutos.

Na realização dos testes, foi utilizada uma balança de precisão Shimadzu® TX323L (Figura 14) para a pesagem da resina, cinzas e catalisador.

Figura 14 – Pesagem da matriz na balança de precisão



Fonte: Autoria própria.

Para a confecção do laminado de PRFV utilizou-se somente a resina poliéster e o catalisador. Foi utilizado a porcentagem correspondente a 0,8 % de catalisador em relação a

massa da resina. Logo após, foi cronometrado o tempo de cura para 30 minutos, sendo possível observar o endurecimento do material e adoção desse intervalo de tempo para os testes com a adição de cinzas da *Pistia stratiotes*.

Para a continuação dos experimentos, foi adicionado as cinzas da macrófita na mistura resina poliéster e catalisador, em que foram verificados os testes de cura de cada um dos oito testes realizados, com proporções diferentes, como mostra a Figura 15.

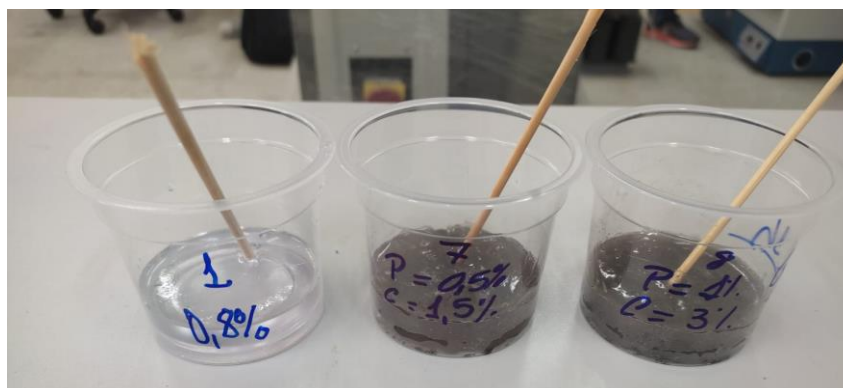
Figura 15 - Teste de cura das resinas.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os testes realizados, foi definido como base 0,8% de catalisador na mistura com o poliéster. Em seguida, para a definição das outras duas proporções da mistura entre resina, catalisador e cinzas da macrófita, as duas porcentagens escolhidas para a laminação foram, para 0,5 % e 1 % de cinzas da *Pistia stratiotes*, os valores de 1,5 % e 3 % de catalisador (em relação a massa de resina), respectivamente. A Figura 16 mostra as três proporções escolhidas para esse trabalho.

Figura 16 - Composto de resinas escolhidas.



Fonte: Autoria própria.

As duas proporções escolhidas devido aos testes do tempo de cura, foram selecionadas em razão dos critérios de endurecimento da matriz, pois a adição de mais catalisador não influenciou de forma significativa a cura da resina. Logo após, elas foram comparadas com o compósito de fibra de vidro sem a adição das cinzas na sua composição.

Posteriormente, foi realizado o corte das camadas de fibra de vidro para a laminação, no qual a matriz do corpo de prova consistiu de dez camadas de fibra de vidro, com dimensões de 35 x 62 cm, utilizando o processo *Hand Lay-Up*. É possível visualizar a camada de fibra de vidro na Figura 17.

Figura 17 - Dimensão do tecido de fibra de vidro.

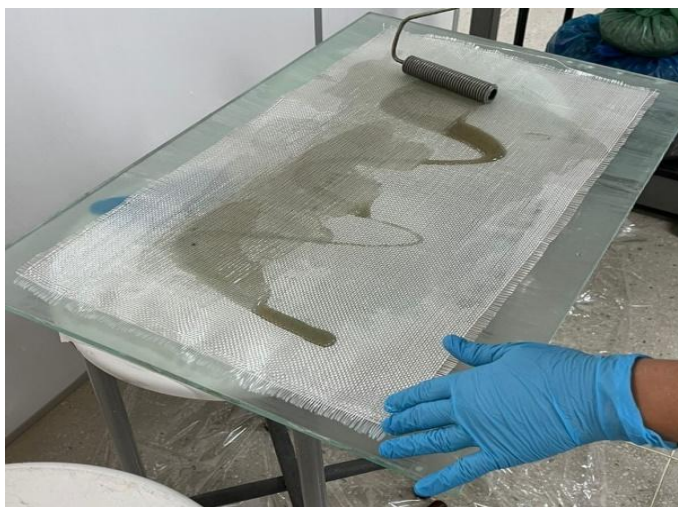


Fonte: Autoria própria.

Em seguida foi utilizado um molde para dar forma ao compósito, no qual foram utilizadas duas placas de vidros no processo. Antes da laminação, a placa precisa estar limpa para evitar qualquer desvio nos resultados e aplicado o desmoldante para facilitar a retirada do laminado.

Logo após os procedimentos necessários é iniciada a laminação com o método *Hand Lay-Up* consistindo na matriz compósito com a adição de 10 camadas de tecido de fibra de vidro, sendo usado um rolo metálico na distribuição da resina sobre o tecido, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Laminação *Hand Lay-Up*.



Fonte: Autoria própria.

Após a laminação das dez camadas de fibra de vidro é necessário aplicar o molde superior formando um “sanduíche” contendo a ordem respectivamente:

1. Molde – Placa Inferior;
2. Compósito polimérico reforçado com fibra de vidro;
3. Molde – Placa Superior.

Foram utilizados espaçadores nas extremidades das placas com espessura média de 2,5 mm com o intuito de obter para o laminado a mesma espessura, e prensados por garras para ajudar na fixação (Figura 19) em conjunto com o auxílio de um peso sobre a placa superior pressionando o molde ao material, ajudando a resina ser espalhada sobre a fibra.

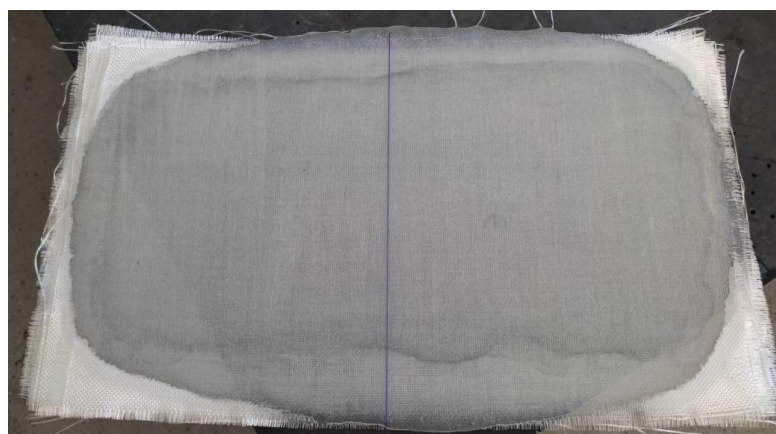
Figura 19 - Fixação do molde na matriz polimérica.



Fonte: Autoria própria.

O tempo de cura determinado para a matriz polimérica foi de 24 horas, tempo necessário até a resina já estar curada no estado termofixo e pronta para ser retirada do molde, como mostra na Figura 20. A placa formada foi submetida a uma medição de espessura com o auxílio de um micrômetro digital.

Figura 20 - Matriz polimérica no estado termofixo.

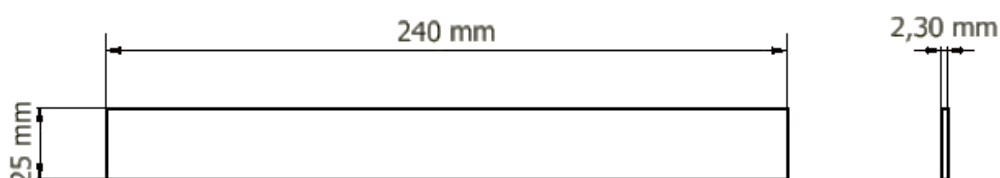


Fonte: Autoria própria.

Em seguida, após a matriz polimérica ser formada, é necessária a demarcação para o corte dos corpos de prova, sendo utilizada a largura de $25 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$ com base com na norma ASTM D3039 (2017), como mostra a Figura 21. Destaca-se que a norma recomenda 250 mm de comprimento, mas pela limitação da garra, foi necessário deixar 240 mm. O galgo utilizado foi de 127 mm.

Tendo obtidos os corpos de prova foi feito o processo de acabamento dos mesmos, utilizando a lixa 100, 600 e 1200, juntamente com o auxílio de um paquímetro para averiguar as dimensões do material a fim de estar pronto para o ensaio de tração. O processo de acabamento dos corpos de prova foi adotado com as seguintes dimensões (Figura 21).

Figura 21 - Dimensionamento do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

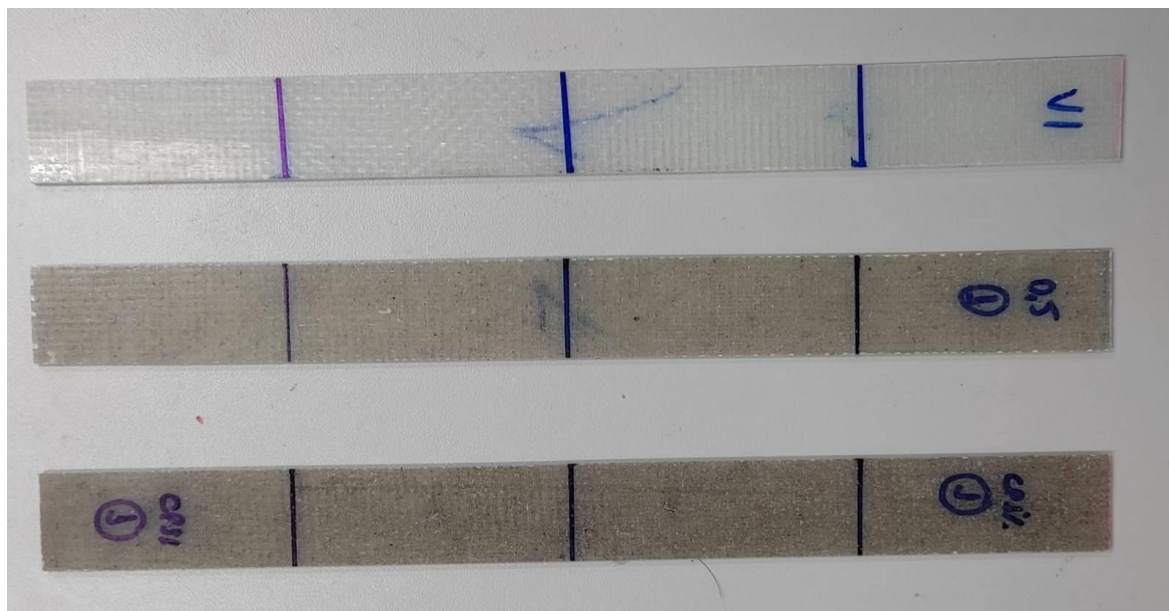
Foram marcados dez corpos de provas de cada material, sendo eles, respectivamente: PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0% como descrito no Quadro 4 e na Figura 22.

Quadro 4 - Descrição normativa dos CP's utilizados.

Código	Descrição normativa
PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
PRFV + 0,5%	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro + 0,5% de cinzas da <i>Pistia stratiotes</i>
PRFV + 1,0%	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro + 1,0% de cinzas da <i>Pistia stratiotes</i>

Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - Proporções para os CP's.



Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção dos corpos de prova, o material foi marcado com as nomenclaturas e o espaço do galgo de 127 mm para serem identificados e testados corretamente evitando erros de leitura no ensaio de tração.

4.2.3 Ensaio de Tração Uniaxial

Na realização do ensaio de tração, foi utilizada a máquina EMIC® DL 10000 de capacidade máxima de 100 kN (Figura 23), sendo a responsável por obter os dados de

deformação (mm) e força (N) dos corpos de prova. Destaca-se que foi utilizado a célula de carga de 30 kN.

Figura 23 - Máquina utilizada para ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Para obter as propriedades mecânicas desejadas, foram utilizadas as seguintes equações: Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3.

$$\sigma = \left(\frac{P}{A} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

A tensão (σ) é igual ao peso aplicado (P) sobre a área (A) da seção transversal média de cada corpo de prova em mm² (Eq.1).

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

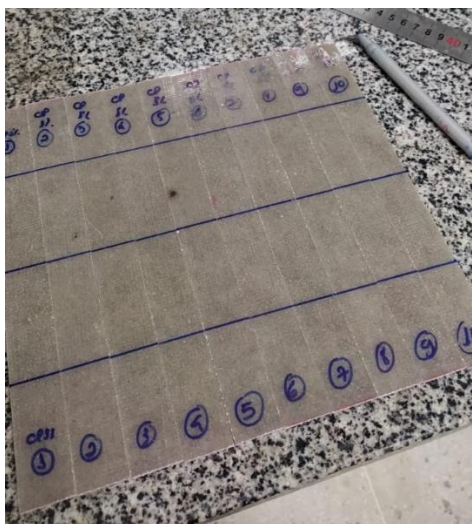
A deformação (ε) é igual à variação do comprimento (ΔL) sobre o comprimento útil do corpo de prova (L_0) (Eq.2). O comprimento útil do corpo de prova é de 127 mm.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 3}$$

O módulo de elasticidade (GPa) foi calculado no ponto correspondente a 50% da tensão de ruptura e calculado pelo método da secante. No qual a variação da tensão (σ) é dividido pela deformação (ϵ).

Seguindo para o manuseio e utilização dos CP's na máquina de ensaio de tração uniaxial, é preciso que elas sejam marcadas corretamente para estar de acordo com a área delimitada dos galgos, conforme Figura 24, e então ser colocada em teste (Figura 25). Primeiramente foram testados os corpos de prova de fibra de vidro, e logo após as outras proporções com adição das cinzas da *Pistia stratiotes* 0,5 % e 1 %.

Figura 24 - Marcação dos galgos nos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Corpo de prova no ensaio de tração com os limites no galgo.



Fonte: Autoria própria.

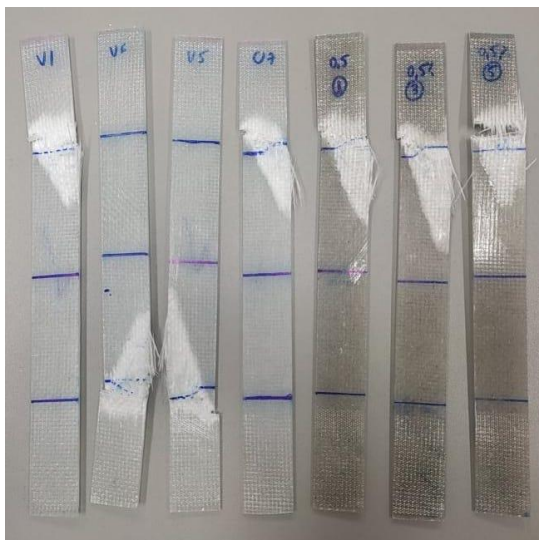
Durante o ensaio de tração os CP's selecionados foram os que obtiveram fraturas na região demarcada entre os galgos, qualquer fratura que ao final do teste ultrapasse a demarcação seria descartada. A Figura 26 e 27 mostram as falhas de CP's durante a realização dos ensaios.

Figura 26 - Fratura do corpo de prova dentro do galgo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Fraturas fora do limite – classificadas como não válidas.



Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos testes com todas as 3 proporções dos CP's e satisfazendo os critérios de avaliação já citados anteriormente, é possível obter os resultados da Tensão x Deformação dos três materiais, individualmente.

Para obter os gráficos de Tensão e Deformação é necessário que haja os dados fornecidos pela máquina do ensaio de tração uniaxial, no qual determina a força (N) e deformação (mm) do material como mostra na Figura 28, à medida que o mesmo é esticado de acordo com o tempo.

Figura 28 – Exemplo dos dados fornecidos pela máquina após o ensaio.

Tempo(s)	Deformação(mm)	Força(N)
0,016667	0,00000	-1,9008
0,083333	0,00052120	-0,95040
0,10000	0,0011293	-0,95040
0,11667	0,0015636	-1,9008
0,15000	0,0022585	-0,95040
0,16667	0,0028666	-0,95040
0,18333	0,0033009	-0,95040
0,20000	0,0037352	-0,95040
0,21667	0,0042564	-0,95040
0,23333	0,0047776	-0,95040
0,25000	0,0051251	-0,95040
0,26667	0,0057332	-0,95040
0,28333	0,0063412	0,00000
0,30000	0,0068624	0,95346
0,31667	0,0074705	2,8604
0,33333	0,0079917	4,7673

Fonte: Autoria própria.

Em seguida com a utilização das equações 1, 2 e 3 é obtido a tensão (MPa), deformação (%) e o módulo de elasticidade do material (GPa), sendo armazenado os dados no Excel® e plotados no Origin® podendo assim obter o gráfico Tensão x Deformação dos CP's e observar os resultados com cada proporção testada.

4.2.4 Ensaio de Densidade Volumétrica

Inicialmente para o ensaio de densidade volumétrica foram preparados 5 corpos de prova para cada proporção utilizada (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1% de cinzas) de dimensão 25x25 mm aproximadamente (Figura 29).

Para a preparação dos corpos de prova foi feito um acabamento e pesagem dos materiais garantindo que todos os CP's tivessem o peso acima de 1g, peso necessário para que não houvesse falhas nas análises após os testes.

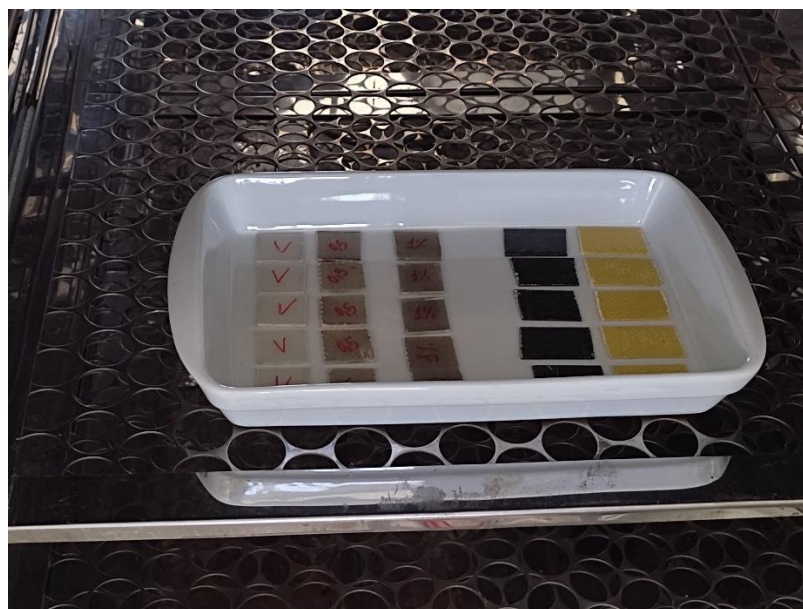
Figura 29 – CP's preparados para o processo de secagem e esterilização.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente os corpos de prova passaram por um processo de secagem na estufa de secagem e esterilização SOLAB® SL-100 a 100° C por 1 hora, mostrado na Figura 30 e 31. Neste procedimento, a estufa é utilizada para remover completamente a umidade dos corpos de prova que foram colocados nela.

Figura 30 - Ilustração dos CP's na estufa



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Estufa de secagem e esterilização na estufa.



Fonte: Autoria própria.

Após o tempo de secagem dos corpos de prova foi necessário a utilização do dessecador para o resfriamento dos CP's em um ambiente isolado do ambiente externo, evitando que absorva umidade. Em seguida, após a inserção dos corpos de prova no dessecador (Figura 32 e 33), é cronometrado mais 1 hora no processo de resfriamento dos materiais.

Figura 32 - Dessecador com os CP's no seu interior.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - CP's no processo de resfriamento no dessecador.



Fonte: Autoria própria.

Logo após 1 h do tempo de resfriamento dos CP's, os materiais foram retirados do dessecador e passaram por uma pesagem na balança de precisão Shimadzu® AUY220 (Figura 34). Para a medição de densidade volumétrica são necessárias a massa seca e a massa submersa em água destilada dos corpos de prova.

Primeiramente é feito a medição da amostra seca dos corpos de prova, o manuseio dos CP's nesse processo é feito utilizando pinça para evitar qualquer alteração dos resultados.

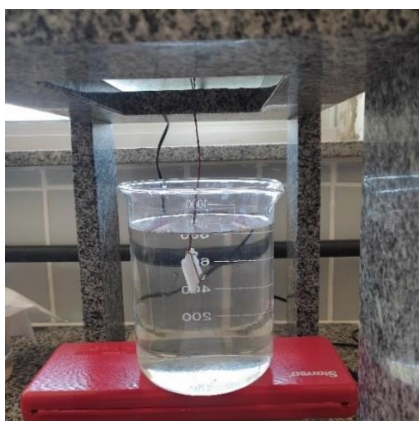
Figura 34 - Pesagem do CP (amostra seca) na balança de precisão.



Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção da amostra seca dos corpos de prova, foi feita a medição dos CP's submersos em água destilada (Figura 35). Antes da medição foi necessário obter a massa do afundador composto por cobre para não modificar a análise de peso do material. Em seguida os CP's foram apoiados no medidor abaixo da balança, fixados no afundador e submersos na água destilada, mantendo o cuidado do corpo de prova não entrar em contato com o vidro a fim de não alterar os resultados.

Figura 35 - Pesagem do CP (massa submersa) na balança de precisão.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, após a medições de todas as medidas foi registrado os resultados (Figura 36) e repassados ao software Excel para a montagem da planilha de densidade e obtenção dos valores médios e o desvio padrão para cada proporção dos CP's (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1%).

Figura 36 - Registro dos dados obtidos pela pesagem na balança de precisão.

	1	2	3	4	5
VIDRO	$m_{\text{sec}} = 2,5653$ $m_{\text{sub}} = 2,4936$	$m_{\text{sec}} = 2,5068$ $m_{\text{sub}} = 2,4821$	$m_{\text{sec}} = 2,5733$ $m_{\text{sub}} = 2,4730$	$m_{\text{sec}} = 2,4934$ $m_{\text{sub}} = 2,4947$	$m_{\text{sec}} = 2,5419$ $m_{\text{sub}} = 2,4642$
	V	1	<	<	V
0,5%	$m_{\text{sec}} = 2,6662$ $m_{\text{sub}} = 2,4729$	$m_{\text{sec}} = 2,4454$ $m_{\text{sub}} = 2,4807$	$m_{\text{sec}} = 2,4804$ $m_{\text{sub}} = 2,3954$	$m_{\text{sec}} = 2,5052$ $m_{\text{sub}} = 2,4350$	$m_{\text{sec}} = 2,3976$ $m_{\text{sub}} = 2,3836$
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1%	$m_{\text{sec}} = 2,4236$ $m_{\text{sub}} = 2,4812$	$m_{\text{sec}} = 2,6350$ $m_{\text{sub}} = 2,4742$	$m_{\text{sec}} = 2,4794$ $m_{\text{sub}} = 2,4222$	$m_{\text{sec}} = 2,4759$ $m_{\text{sub}} = 2,4443$	$m_{\text{sec}} = 2,4135$ $m_{\text{sub}} = 2,3882$
	1%	1%	1%	1%	1%

Fonte: Autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos. Inicialmente serão expostas as medidas de espessura dos laminados, seguido do ensaio de densidade e ensaio de tração uniaxial.

5.1 Espessura dos CP's

Na medição das espessuras dos CP's foi utilizado um micrômetro digital e feito a média dos valores em cinco pontos de medição na área útil dos CP's para obter a espessura média de cada compósito, na Tabela 2 é mostrado os valores da espessura média e desvio padrão dos laminados.

Tabela 2 - Espessura média dos CP's.

Laminado	Espessura média (mm)	Desvio padrão
PRFV	2,33	0,01
PRFV + 0,5%	2,32	0,01
PRFV + 1,0%	2,31	0,02

Fonte: Autoria própria.

A espessura média dos CP's com dez camadas de PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV 1% foi de aproximadamente 2,3 mm com valores de desvio padrão similares, houve a aplicação de um peso sobre o molde para melhor distribuição da resina.

5.2 Densidade Volumétrica dos CP's

Para o ensaio de densidade volumétrica a Tabela 3 mostra os materiais laminados, o valor médio e o desvio padrão para os três compósitos (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%).

Tabela 3 - Dados da densidade volumétrica dos CP's.

Densidade Volumétrica (g/cm^3)		
Material Laminado	Valor Médio	Desvio Padrão
PRFV	1,66	0,01
PRFV + 0,5%	1,63	0,01
PRFV + 1%	1,65	0,01

Fonte: Autoria própria.

Para o PRFV, obteve-se o valor médio de $1,66 g/cm^3$, com desvio padrão de 0,01. Os valores obtidos de densidade volumétrica por outros trabalhos como, por exemplo, Felipe (2012), no qual utilizou-se uma lâmina com uma camada manta de fibra de vidro/E, encontrou o valor de densidade volumétrica de $1,52 g/cm^3$. Fontes (2017), para quatro camadas de manta de fibra de vidro com a resina Epóxi, obteve $1,54 g/cm^3$. Os valores estão coerentes, porém o fator que influenciou no resultado, causando em um valor maior em relação aos outros trabalhos, foi o percentual de fibras que foram utilizadas, neste trabalho foi utilizado dez camadas de tecido de fibra de vidro. Destaca-se que mantas de fibra de vidro/E tendem a ter uma maior absorção da resina.

A densidade volumétrica do PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0% obtiveram valores semelhantes ao PRFV, seu valor médio é de $1,63 g/cm^3$ e $1,65 g/cm^3$, mantendo o desvio padrão $0,01 g/cm^3$. Destacando-se que os valores encontrados são próximos.

5.3 Ensaio de Tração Uniaxial

Com o ensaio de tração uniaxial já finalizado, foi possível obter a carga de início de dano e os gráficos de Tensão x Deformação.

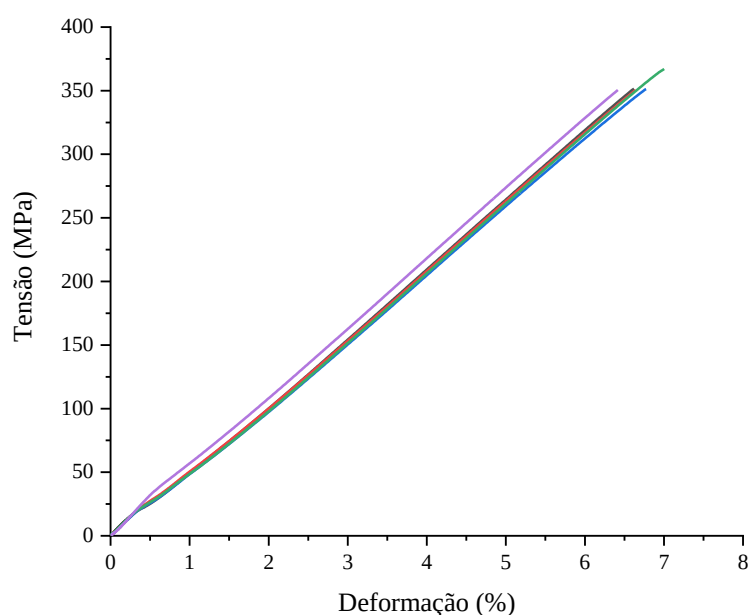
No começo de cada ensaio de tração foi observado a média do início de carga de dano de todos os CP's, carga essa, no qual o material começa a trincar devido aos esforços mecânicos da máquina no material.

Após o término do ensaio, com os gráficos gerados foi possível obter: resistência à ruptura (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e deformação (%). O Desvio Padrão para cada propriedade também foi calculado pela fórmula DESVPAD.A no Excel®. Esses dados serviram de parâmetro para observar os efeitos que a adição do pó gerou ao PRFV.

5.3.1 Caracterização mecânica do PRFV

Para o PRFV o início de carga de dano foi de 13 kN equivalente a aproximadamente 223,35 MPa. Após isso, é adquirido o gráfico de Tensão x Deformação pelos dados obtidos no Excel® e no software Origin®. Para a realização do gráfico Tensão x Deformação do PRFV, foi escolhido cinco CP's que obtiveram fraturas válidas. O Gráfico 1 mostra o comportamento para esse tipo de material.

Gráfico 1 - Tensão x Deformação do PRFV.



Fonte: Autoria própria.

O PRFV apresentou um comportamento aproximadamente linear, característico de materiais frágeis, como observado no Gráfico 1. A tabela 4 representa os dados obtidos dos valores médios de tensão última a tração (MPa), deformação (%) e módulo de elasticidade (GPa) para o PRFV.

Tabela 4 - Dados da deformação, tensão e módulo de elasticidade do PRFV

	PRFV		
	Deformação (%)	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Média	6,70	354,17	5,19
Desvio Padrão	0,21	7,23	0,14

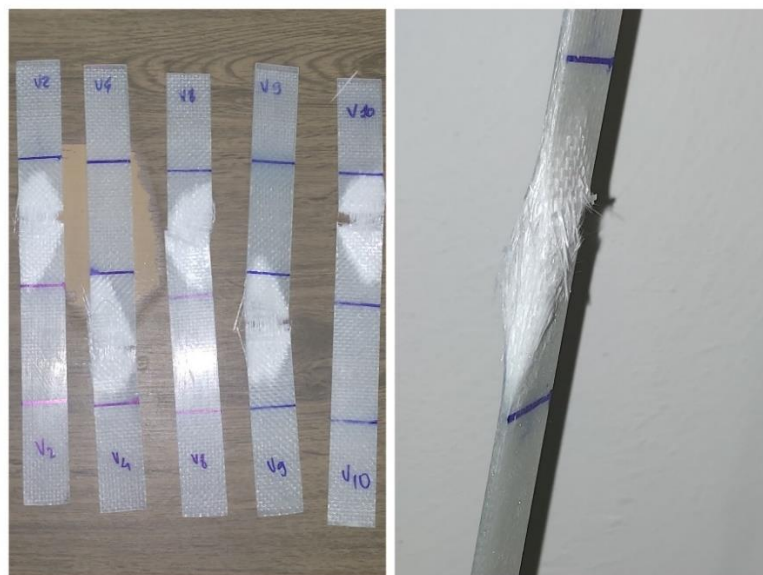
Fonte: Autoria própria.

No trabalho de Lima (2022), os compósitos foram fabricados pelo processo *Hand Lay-Up* com apenas uma camada de fibra de vidro de tipo tela 1x1, onde o resultado para a tensão a tração foi de 136,89 MPa e desvio padrão de 19,18 MPa, já o seu módulo de elasticidade foi de 5,56 GPa com desvio padrão de 0,36.

Para Thiesen Junior (2016), os compósitos foram fabricados pelo processo *Hand Lay-Up*, contendo mantas de fibra de vidro do tipo E6 com matriz resina poliéster, tendo como resultado a resistência a tração de 71,2 MPa. Destaca-se que os percentuais de resina/fibra e/ou tipo de reforço são diferentes do utilizado neste trabalho.

Após os ensaios de tração uniaxial é possível também observar os tipos de fraturas (Figura 37) que ocorreram nos materiais utilizados, classificando de acordo com o código de falha da norma ASTM D3039 (2017).

Figura 37 - Fratura no PRFV



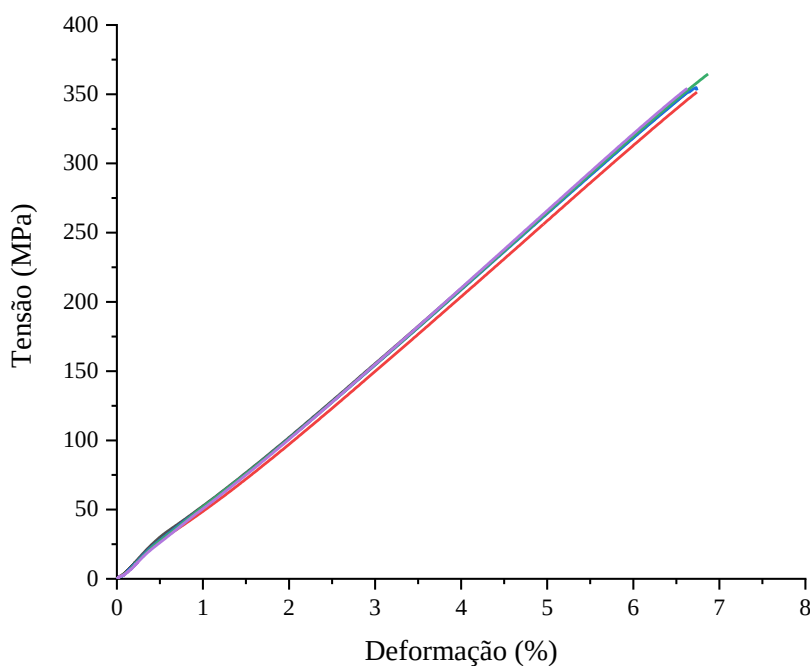
Fonte: Autoria própria.

Seguindo o código de falha de acordo com a norma ASTM D3039 (2017), foi possível obter a análise característica de fratura para o **PRFV**. O tipo de fratura que ocorreu foi semelhante ao tipo de falha **DGM** (delaminação na borda no meio do galgo), porém no ensaiado ocorreu a ruptura das fibras, logo talvez fique melhor caracterizada como **LGM** (Lateral e no meio do galgo).

5.3.2 Caracterização mecânica do PRFV + 0,5%

O início da carga de dano no PRFV + 0,5% foi de 16,5 kN o equivalente a aproximadamente 284,59 MPa. Na realização do gráfico Tensão x Deformação do PRFV + 0,5%, foi escolhido 5 CP's que obtiveram fraturas válidas. O Gráfico 2 mostra o comportamento para esse tipo de material.

Gráfico 2 - Tensão x Deformação PRFV + 0,5%.



Fonte: Autoria própria.

No comportamento da curva do Gráfico 2 pode se observar um comportamento aproximadamente linear, característico de matérias frágeis. A tabela 5 representa os dados obtidos dos valores médios de tensão última a tração (MPa), deformação (%) e módulo de elasticidade (GPa) para o PRFV + 0,5%.

Tabela 5 - Dados de deformação, tensão e módulo de elasticidade do PRFV + 0,5%.

PRFV + 0,5%			
	Deformação	Tensão de ruptura	Módulo de Elasticidade
	(%)	(MPa)	(GPa)
Média	6,75	355,61	5,16
Desvio Padrão	0,09	5,12	0,07

Fonte: Autoria própria.

A curva mostrada no Gráfico 2, conseguiu ter um comportamento satisfatório durante o ensaio de tração uniaxial, a curva indica que a adição não acarretou em uma variação nas propriedades mecânicas do material.

França *et al.* (2020), utilizou o processo de fabricação *Hand Lay-Up* no compósito reforçado particulado com 10 % de granito e quatro camadas de manta de fibra de vidro e encontrou o valor de tensão 71,50 MPa com 3,10 MPa de desvio padrão, deformação de 3,81 % com desvio padrão de 0,21 e módulo de elasticidade com 2,07 GPa e desvio padrão de 0,76 GPa. Na utilização de 10 % do particulado de granito por França *et al.* (2020), observou uma queda na tensão máxima do material no ensaio de tração uniaxial, o que não ocorreu na utilização das cinzas da *Pistia stratiotes*. As variações dos resultados são consequências das diferenças na composição dos compósitos, como a diferença no número de camadas de fibra de vidro, forma como a fibra está disposta, tipo de particulado, e outros fatores.

Após os ensaios de tração uniaxial é possível também observar os tipos de fraturas que ocorreram nos materiais utilizados (Figura 38), classificando de acordo com o código de falha da norma ASTM D3039 (2017).

Figura 38 - Fratura no PRFV + 0,5%



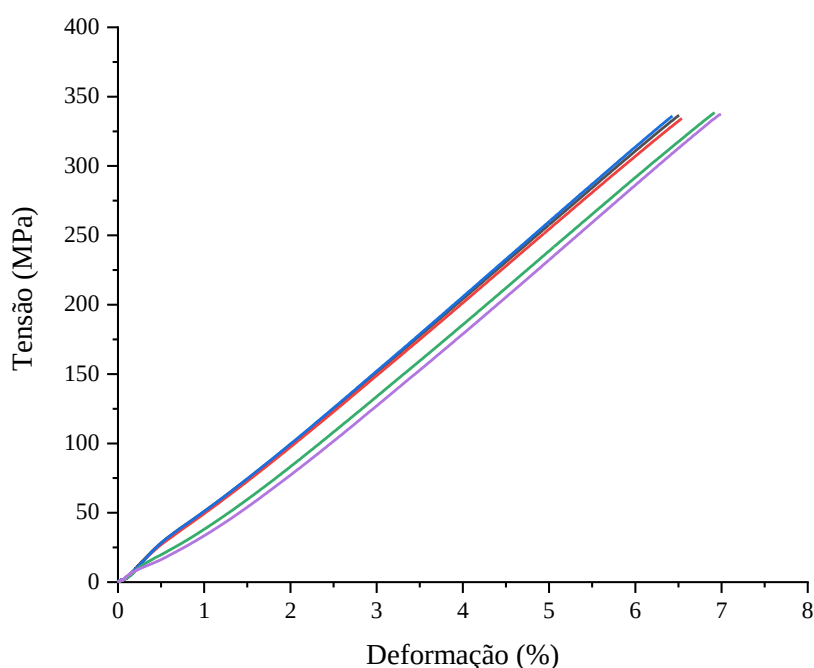
Fonte: Autoria própria.

Seguindo o código de falha de acordo com a norma ASTM D3039 (2017), foi possível obter a análise característica de fratura para o PRFV + 0,5%. O tipo de fratura que ocorreu foi semelhante ao tipo de falha **DGM**, porém no ensaiado ocorreu a ruptura das fibras, logo talvez fique melhor caracterizada como **LGM**.

5.3.3 Caracterização mecânica do PRFV + 1,0%

No PRFV + 1,0% o início de carga de dano obtido foi de 20 kN o equivalente a aproximadamente 344,53 MPa. Na realização do gráfico Tensão x Deformação do PRFV + 1,0%, foi escolhido cinco CP's que obtiveram fraturas válidas. O Gráfico 3 mostra o comportamento do gráfico para esse tipo de material.

Gráfico 3 - Tensão x Deformação PRFV + 1,0%.



Fonte: Autoria própria.

O comportamento da curva do Gráfico 3 pode se observar um comportamento aproximadamente linear, característico de matérias frágeis. A Tabela 6 mostra os dados dos valores médios de tensão última a tração (MPa), deformação (%) e módulo de elasticidade (GPa) para o PRFV + 1,0%.

Tabela 6 - Dados de deformação, tensão e módulo de elasticidade do PRFV 1,0%.

PRFV + 1,0%			
	Deformação (%)	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Média	6,69	336,58	4,83
Desvio Padrão	0,26	1,60	0,30

Fonte: Autoria própria.

Os testes com PRFV + 1,0% foram bem satisfatórios, analisando o Gráfico 3 e a Tabela 6 pôde-se observar que o material manteve suas propriedades mecânicas. É possível visualizar que a placa PRFV + 1,0% possui baixos valores de desvio padrão para a deformação (0,26 %), tensão última a tração (1,60 MPa) e módulo de elasticidade (0,30 GPa).

Brito *et al.* (2023), na fabricação *Hand Lay-Up* utilizando cinco placas sendo quatro de resina poliéster cristal e quatro camadas de manta de fibra de vidro com 10 % de calcário na massa da resina obteve deformação de 3,49 % com desvio padrão de 0,26 %, tensão última de 95,55 MPa com desvio padrão de 5,70 e módulo de elasticidade de 3,28 GPa com desvio padrão de 0,14. A variação desses resultados se dá pela quantidade de camadas de reforço e os materiais utilizados.

Após os ensaios de tração uniaxial é possível observar os tipos de fraturas que ocorreram nos materiais utilizados (Figura 39), classificando de acordo com o código de falha da norma ASTM D3039 (2017).

Figura 39 - Fratura no PRFV + 1,0%.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo o código de falha de acordo com a norma ASTM D3039 (2017), foi possível obter a análise característica de fratura para o PRFV + 1,0%. O tipo de fratura que ocorreu após o ensaio de tração foi a delaminação na borda no meio do galgo do corpo de prova, caracterizando o tipo de falha **DGM**, porém também apresentou características da fratura **AGM** (Angular e no meio do galgo).

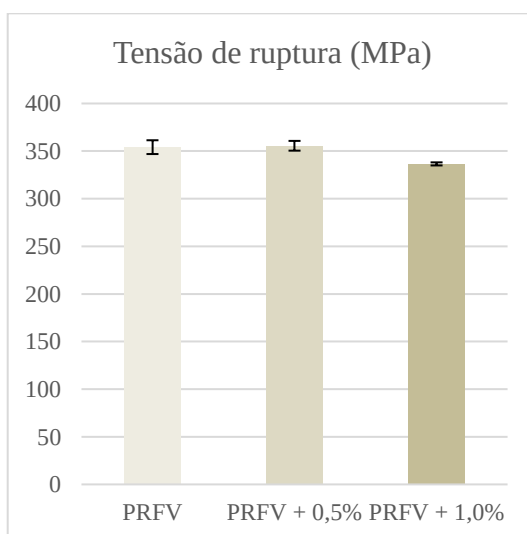
5.4 Comparativo da influência na adição das cinzas *Pistia stratiotes*

Neste item será analisado o resultado dos testes feitos no ensaio de tração uniaxial para todos os laminados estudados. Serão discutidos os valores obtidos de tensão última a tração (MPa), deformação normal (%), módulo de elasticidade (GPa) e início de carga de dano (MPa) entre os materiais PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV + 1,0%. O intuito é observar a influência que a adição das cinzas de *Pistia stratiotes* gerou nas propriedades mecânicas dos materiais.

5.4.1 Comparação entre tensão máxima do PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV + 1,0%

No Gráfico 4 é possível visualizar que a propriedade de resistência última a tração não sofreu alteração dos valores pela adição das cinzas da *Pistia stratiotes*.

Gráfico 4 - Comparativo entre a tensão última a tração do PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%.



Fonte: Autoria própria.

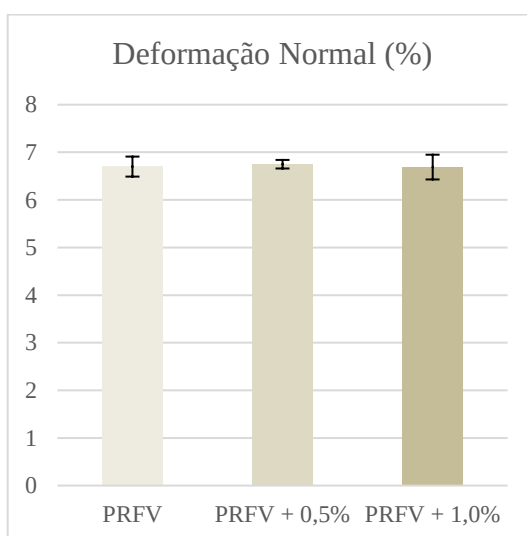
França *et al.* (2020), utilizou o processo de fabricação *Hand Lay-Up* e estudou o PRFV no compósito reforçado particulado com 10% de granito e quatro camadas de manta de fibra de vidro, a autora obteve que a granulometria do pó de granito não influenciou na tensão máxima do material, obtendo o valor de 71,50 MPa para o PRFV com adição de 10 % de granito em relação a massa da resina com granulometria entre 53 μm – 90 μm . Porém a adição do pó causou uma maior espessura do material, ocasionando uma tensão à tração menor em relação ao PRFV.

5.4.2 Comparação entre a deformação do PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV +1,0%

Na deformação, comparando os CP's PRFV (6,70 %), PRFV + 0,5 (6,75 %) e PRFV +1,0% (6,69 %) é possível visualizar pelo Gráfico 5 que a capacidade de deformação do material obteve resultados semelhantes mesmo após a adição das cinzas da *Pistia stratiotes*.

Para Brito *et al.* (2023), na fabricação *Hand Lay-Up* utilizando cinco placas sendo quatro de resina poliéster cristal e quatro camadas de manta de fibra de vidro, a adição do pó de pedra nos corpos de prova também não obteve influência significativa na deformação dos CP's, obtendo valores de 3,16 até 3,50 %. Pelos resultados de Brito *et al.* (2023), também não houve mudança nas propriedades da deformação percentual dos CP's, pelos resultados do desvio padrão foi observado uma melhor uniformidade do material com a adição das cinzas, diminuindo seu desvio padrão.

Gráfico 5 - Comparativo da deformação entre PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%.



Fonte: Autoria própria

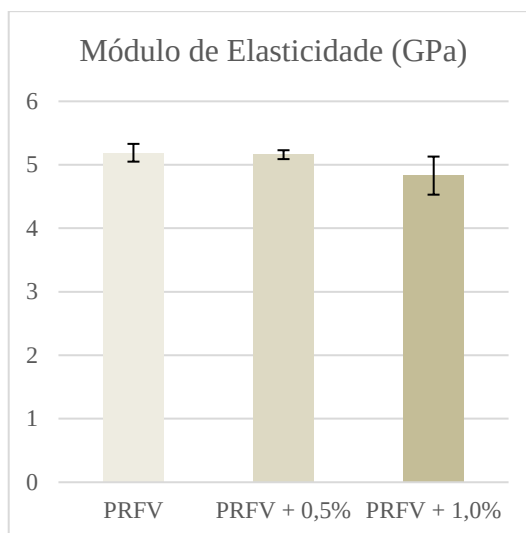
5.4.3 Comparação entre o módulo de elasticidade do PRFV, PRFV + 0,5 e PRFV +1,0%

No quesito do módulo de elasticidade dos materiais, pôde-se visualizar no Gráfico 6 uma similaridade do PRFV em relação ao PRFV +0,5%, porém, um desvio padrão maior no PRFV + 1,0%. A adição de 1,0 % de cinzas da macrófita no PRFV acarretou uma leve redução no módulo de elasticidade do material e um aumento no desvio padrão.

Para Silva (2020), na fabricação do material compósito, utilizou-se como matriz termofixa tipo resina EPOXI 2001 e o endurecedor 3154, e como reforço a cinza da *Pistia*

stratiotes, a adição de 1,5 % de *Pistia stratiotes* não alterou o módulo de elasticidade, mantendo o valor de 0,92 GPa com desvio padrão de 0,02.

Gráfico 6 - Comparativo do módulo de elasticidade entre PRFV, PRFV +0,5% e PRFV + 1,0%.



Fonte: Autoria própria.

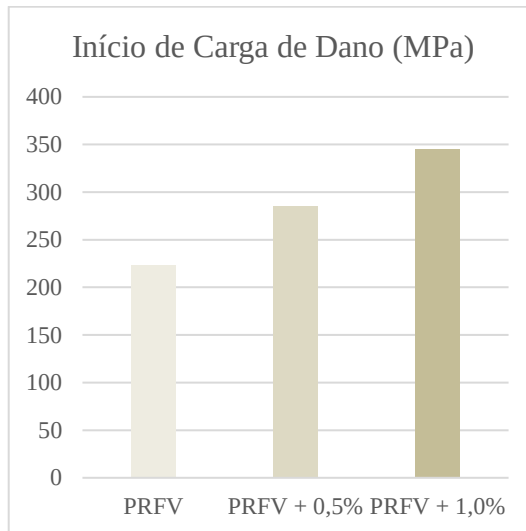
5.4.4 Influência da adição das cinzas da *Pistia stratiotes* no Início da Carga de Dano

Para o começo de cada ensaio de tração foi observado a média do “Início de Carga de Dano” de todos os CP’s, no qual é preciso observar o momento em que o material começa a trincar devido a tração uniaxial ocasionada pelos esforços mecânicos da máquina no material, os valores foram obtidos pela média dos cinco materiais selecionados, para cada um dos três tipos (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV +1,0%), como mostrado no Gráfico 7.

De acordo com os dados do Gráfico 7, é possível visualizar que a utilização das cinzas de *Pistia stratiotes* auxiliou no aumento do início de carga de dano do material. Destaca-se que não se deve realizar um dimensionamento com valores acima da carga de início de dano, sendo esta a tensão de projeto.

Os valores comprovaram bons resultados nesse aspecto, a vantagem do PRFV + 1,0% em relação ao PRFV foi de 54,25% e entre PRFV + 0,5% e PRFV a vantagem foi de 27,41%. Esses valores expressivos demonstram que houve uma influência positiva no início de carga de dano ocasionando uma maior resistência ao início de dano (trincamento da matriz) à medida que fosse adicionado as cinzas de *Pistia stratiotes*. Podendo estar relacionado com também com o percentual de catalizador utilizado.

Gráfico 7 - Início de carga de dano dos materiais.



Fonte: Autoria própria.

6. CONCLUSÃO

Após as análises realizadas nos PRFV com a adição de cinzas de *Pistia stratiotes*, obtidas a partir dos ensaios de densidade e tração uniaxial, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Nos valores médios obtidos para densidade volumétrica houve uma similaridade, o que causou resultados parecidos na adição das cinzas de *Pistia stratiotes* nos PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%.
- A tensão máxima à ruptura dos três compósitos propostos (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%) obteve propriedades semelhantes de resistência última a tração, os valores obtidos se mantiveram com uma diferença percentual insignificante.
- O módulo de elasticidade foi similar mesmo com a adição das cinzas da *Pistia stratiotes*, mantendo as propriedades do material em relação a esse aspecto.
- O início de carga de dano após a inserção das cinzas da macrófita nos PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0% apresentaram valores bem positivos durante o ensaio de tração uniaxial. Esses valores demonstram que houve uma boa influência no início de carga de dano à medida que fosse adicionado as cinzas de *Pistia stratiotes*. Destaca-se que o percentual de catalizador utilizado nos laminados foi diferente, para tentar igualar o tempo de cura dos laminados.

Portanto, conclui-se que a adição das cinzas de *Pistia stratiotes* em PRFV se mostra viável, pois as propriedades mecânicas de resistência última à tração, módulo de elasticidade e deformação apresentaram valores semelhantes, sendo uma alternativa do manejo da *Pistia stratiotes* que estão no ciclo final de vida. Essa ação impede que os poluentes previamente absorvidos pela macrófita sejam reintroduzidos no ambiente quando a planta se decompõe, assegurando, desse modo, o fechamento eficiente do ciclo. É importante ressaltar que a carga de início de dano foi consideravelmente aprimorada, o que representa uma vantagem adicional em sua utilização, especialmente em cenários que demandam propriedades robustas nesse aspecto.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Maurício Gomes de et al. **Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I-Fitoextração**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 1879-1888, 2009.
- ASTM D3039. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2017.
- ASTM D792. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement**. 2008.
- 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.
- BRITO, Matheus Thomas de Oliveira et al. **Influence on mechanical properties with the addition of limestone powder in polyester/fiberglass composite**. Journal Of Composite Materials, [S.L.], v. 57, n. 12, p. 1989-1998, 4 abr. 2023. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/00219983231167215>.
- CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais um Introdução**. 10.ed. Rio de Janeiro: LTC, Rio de Janeiro, 2021.
- CASARIL, Alexandre. **Modelagem matemática e avaliação experimental do módulo de elasticidade de materiais compósitos particulados de matriz fenólica para uso como material de fricção**. 2009. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- CASTRO, Alessandro Justino de. **Resina poliéster: caracterização e estudo das condições de cura e propriedades mecânicas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- COETZEE, J. A. et al. **Biological control of water lettuce, *Pistia stratiotes* L., facilitates macroinvertebrate biodiversity recovery: a mesocosm study**. Hydrobiologia, [S.L.], v. 847, n. 18, p. 3917-3929, 3 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-020-04369-w>.
- ELKINGTON, M. et al. **Hand layup: understanding the manual process. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science**, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 138-151, 3 jul. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/20550340.2015.1114801>.

FELIPE, Raimundo Nonato Barbosa. **EFEITOS DA RADIAÇÃO UV, TEMPERATURA E VAPOR AQUECIDO NOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: MONITORAMENTO, INSTABILIDADE ESTRUTURAL E FRATURA**. 2012. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

FONTES, Rafael Siqueira. **Compósitos Poliméricos Reforçados por Tecidos Multiaxiais acoplados: Anisotropia, Configuração e Concentração da Deformação**. 2017. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FRANÇA, Rafaela Jordania Marinho et al. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA EM PRFV**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL VIRTUAL DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO DO IFCE, 1., 2020, Caraúbas. Anais [...]. Fortaleza: Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação do Ifce, 2020.

FREITAS, Fernanda Beatriz Aires de. **ESTUDO DA VIABILIDADE NA UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS PARTICULADOS**. 2018. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2018.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**, 2ª edição. [Barueri]: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2114-0. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 12 set. 2023.

KHAN, Q. *et al.* **Phytoremediation of toxic heavy metals in polluted soils and water of Dargai District Malakand Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan**. Brazilian Journal of Biology, v. 84, p. e265278, 2004.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

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, 2022.

LOPES, Bruno Leonardy S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos**. [S.I.]: Editora Blucher, 2017. E-book. ISBN 9788580392920. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580392920/>. Acesso em: 09 jul. 2023.

LORANDI, Natalia Pagnoncelli *et al.* **Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos**. Scientia Cum Industria, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 48, 2 abr. 2016. Universidade Caixias do Sul. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v4iss1p48>.

MAFRA, Márcio Paulo de Araújo. **CARACTERIZAÇÃO EM TRAÇÃO E IMPACTO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS DE PENTE DE MACACO (APEIBA TIBOURBOU AUBL.), MUTAMBA (GUZUMA ULMIFOLIA) E PINDAÍBA (GUATTERIA**

POEPPIGIANA) CONFECIONADOS EM MATRIZ POLIÉSTER. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2018.

MANAHAN, Stanley E. **Química ambiental.** Porto Alegre: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788565837354. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837354/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

MELO, Patrícia Maria Alves. **Compósitos particulados de polietileno de alta densidade e concha de molusco:** efeito do teor e da granulometria. 2013. 79 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, 2013.

NASCIMENTO, Diogo Monteiro do. **Processamento e caracterização de compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA6061 com reforço particulado cerâmico através da técnica de moagem de alta energia e extrusão a quente.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

NAZ, R. *et al.* **Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted industrial soils.** Brazilian Journal of Biology, v. 84, p. e264473, 2022.

ODJEGBA, V. J.; FASIDI, I. O. **Accumulation of Trace Elements by Pistia stratiotes:** implications for phytoremediation. Ecotoxicology, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 637-646, out. 2004. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10646-003-4424-1>.

POMPEO, M. L. M. **Monitoramento e Manejo de Macrófitas Aquáticas.** Oecologia brasiliensis, v. 12, n. 3, p. 406-424, 2008. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2882865.pdf>. Acesso em: 13 de ago. 2020.

SANTOS, Gabriel Borges dos *et al.* **BIOQUIMICA AMBIENTAL.** Revista Macambira, [S.L.], v. 4, n. 2, p. e042004, 11 out. 2020. Revista Macambira. <http://dx.doi.org/10.35642/rm.v4i2.461>.

SILVA, Nilson Francisco da. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UMIDADE EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM CINZAS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS.** 2020. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2020.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais.** Porto Alegre: Grupo A, 2012. E-book. ISBN 9788580551150. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551150/>. Acesso em: 13 set. 2023.

SOUZA, Ana Kely Rufino; MORASSUTI, Claudio Yamamoto; DEUS, Warley Batista de. **POLUIÇÃO DO AMBIENTE POR METAIS PESADOS E UTILIZAÇÃO DE VEGETAIS COMO BIOINDICADORES**. Acta Biomédica Brasiliensia, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 95, 15 dez. 2018. Universidade Iguazu - Campus V. <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.189>.

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. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

UGURAL, Ansel C. **Mecânica dos Materiais**. Grupo GEN, 2009. E-book. ISBN 978-85-216-2485-1. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2485-1/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 21, p. 10–19, 2009.