



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

Gustavo de Brito Alves

Análise da viabilidade da adição de cinza de *Eichhornia crassipes* em PRFV

CARAÚBAS-RN

2023

Gustavo de Brito Alves

Análise da viabilidade da adição de cinza de *Eichhornia crassipes* em PRFV

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof^a. Dra. 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.

A474a Alves, Gustavo de Brito.
Análise da viabilidade da adição de cinza de
Eichhornia crassipes em PRFV / Gustavo de Brito
Alves. - 2023.
53 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. biomassa. 2. compósito. 3. fibra de vidro.
4. macrófitas aquáticas. 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
RodriguesCRB: 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.

Gustavo de Brito Alves

Análise da viabilidade da adição de cinza de *Eichhornia crassipes* em PRFV

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Defendida em: 11/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS BATISTA**
Data: 18/10/2023 20:28:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista.
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL FREITAS FREIRE MARTINS**
Data: 18/10/2023 21:42:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Freitas Freire Martins
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **ADIANA NASCIMENTO SILVA**
Data: 18/10/2023 21:24:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Adiana Nascimento Silva.
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **WENDELL ALBANO**
Data: 18/10/2023 21:01:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wendell Albano.
Membro Examinador

RESUMO

Diante dos inúmeros problemas ambientais da atualidade, o homem sempre busca a evolução de maneira que não degrade o meio ambiente. Uma das partes mais afetadas pela poluição é o ambiente hídrico, com as águas sendo contaminadas, especialmente, por metais pesados. Diante desse fato, os estudos sobre as macrófitas aquáticas tem aumentado cada vez mais, visto que elas possuem a capacidade de absorver poluentes e nutrientes em excesso do meio aquático que se encontram. Dentre as espécies das macrófitas aquáticas destaca-se a *Eichhornia crassipes* por sua incrível capacidade de absorção desses poluentes/nutrientes e descontaminação das águas, entretanto ela é capaz de apresentar um crescimento descontrolado, o qual gera uma quantidade de biomassa excessiva que acaba trazendo diversos outros problemas ao ambiente. Sabendo disso este trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade do uso da biomassa dessas macrófitas aquáticas, que foram transformadas em cinzas, e empregadas como reforço para a produção de um material compósito. A fabricação do material foi realizada utilizando como matriz a resina poliéster e como reforço as cinzas de macrófitas aquáticas da espécie *Eichhornia crassipes* e 10 camadas de tecido de fibra de vidro. As cinzas foram adicionadas nas proporções de 1 % e 1,5 % em relação a quantidade de resina. Após a confecção dos laminados e preparo de todos os corpos de provas, as peças foram submetidas ao ensaio de tração uniaxial tendo como referência a norma da ASTM D3039 (2017) e ao ensaio de densidade volumétrica, que seguiu a norma ASTM D792 (2008). Como resultado foi possível concluir que a adição de 1,5 % de cinzas no material compósito não gerou melhorias significativas, porém, não alterou as propriedades do material, apresentando os valores de 359,04 MPa, 5,09 GPa e 6,75 % para tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação, respectivamente, logo se torna uma forma de aproveitar o excesso da biomassa produzida pela *Eichhornia crassipes*.

PALAVRAS-CHAVE: biomassa; compósito; fibra de vidro; macrófitas aquáticas.

ABSTRACT

In the face of today's numerous environmental problems, man always seeks evolution in a way that does not degrade the environment. One of the parts most affected by pollution is the water environment, with the waters being contaminated, especially, by heavy metals. In view of this fact, studies on aquatic macrophytes have increased more and more, since they have the ability to absorb pollutants and nutrients in excess from the aquatic environment in which they are found. Among the species of aquatic macrophytes, *Eichhornia crassipes* stands out for its incredible ability to absorb these pollutants/nutrients and decontaminate water, however it is capable of presenting an uncontrolled growth, which generates an excessive amount of biomass that ends up bringing several other problems to the environment. Knowing this, this work aimed to verify the feasibility of using the biomass of these aquatic macrophytes, which were transformed into ashes, and used as reinforcement for the production of a composite material. The fabrication of the material was carried out using polyester resin as a matrix and as reinforcement the ashes of aquatic macrophytes of the species *Eichhornia crassipes* and 10 layers of fiberglass fabric. The ashes were added in the proportions of 1% and 1.5 % in relation to the amount of resin. After making the laminates and preparing all the specimens, the parts were submitted to the uniaxial tensile test with reference to the ASTM D3039 (2017) standard and to the volumetric density test, which followed the ASTM D792 (2008) standard. As a result, it was possible to conclude that the addition of 1.5 % of ash in the composite material did not generate significant improvements, however, it did not change the properties of the material, presenting the values of 359.04 MPa, 5.09 GPa and 6.75 % for maximum stress, modulus of elasticity and deformation, respectively, so it becomes a way to take advantage of the excess biomass produced by *Eichhornia crassipes*.

KEYWORDS: biomass; composite; fiberglass; aquatic macrophytes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Macrófita aquática da espécie <i>Eichhornia crassipes</i> .	14
Figura 2 - Esquema de classificação de materiais compósitos.	17
Figura 3 - Representações esquemáticas da organização das fibras em compósitos (a) contínuas e alinhadas (b) descontínuas e alinhadas (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.	18
Figura 4 - Representação de compósito particulado.	20
Figura 5 - Principais configurações de compósitos híbridos: Interlaminares: Fibras contínuas (a), Randômica (b) e Alinhada (c); Intraliminar ou Intrafeixes: Fibras contínuas (d) e Alinhada (e); Entremeados: Fibras contínuas (f), Randômica (g), Alinhada (h).	22
Figura 6 - Tipos de fratura no corpo de prova.	23
Figura 7 – Fluxograma dos processos.	28
Figura 8 - Ilustração do das placas de vidro com distribuição dos espaçadores.	30
Figura 9 - Grampos tipo c apertando as placas de vidro.	30
Figura 10 - Desmoldante.	31
Figura 11 - Etapas do processo de laminação Hand Lay-up.	32
Figura 12 - (A) Estufa utilizada (B) Corpos de prova no dessecador.	34
Figura 13 - Pesagem do corpo de prova imerso na água.	34
Figura 14 - Máquina de ensaio universal EMIC.	35
Figura 15 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV.	39
Figura 16 - Fraturas dos corpos de prova de PRFV.	40
Figura 17 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV+1%.	41
Figura 18 - CPs de PRFV+1% após o ensaio de tração uniaxial.	42
Figura 19 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV+1,5%.	43
Figura 20 - Fraturas dos corpos de prova de PRFV+1,5%.	44
Figura 21 - Tensão máxima dos CPs de PRFV e PRFV+1,5%.	45
Figura 22 - Deformação dos CPs de PRFV e PRFV+1,5%.	45
Figura 23 - Módulo de elasticidade dos CPs de PRFV e PRFV+1,5%.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem dos elementos presentes na cinza da <i>Eichhornia crassipes</i>	29
Tabela 2 - Densidade volumétrica das amostras.	37
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV.....	39
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV+1%.	41
Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV+1,5%.	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definição dos tipos de falhas.	23
Quadro 2 - Equipamentos utilizados.	26
Quadro 3 - Nomenclatura e Definição dos CPs para o ensaio de tração uniaxial.	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Macrófitas aquáticas	13
3.1.1 <i>Eichhornia crassipes</i>	13
3.1.2 Fitorremediação	14
3.2 Materiais compósitos	15
3.2.1 Classificação dos compósitos	16
3.2.2 Compósitos reforçados com fibras	18
3.2.2.1 Compósitos reforçados com fibras de vidro	19
3.2.2.2 Compósitos reforçados com partículas	19
3.2.3 Compósitos híbridos	20
3.2.4 Ruptura	22
3.2.5 Processos de fabricação dos compósitos	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Materiais	25
4.1.1 Materiais utilizados na confecção dos compósitos	25
4.1.2 Vidrarias e utilitários	25
4.1.3 Equipamentos	25
4.2 Métodos	26
4.2.1 Processamento da <i>Eichhornia crassipes</i>	27
4.2.2 Fabricação do molde para confecção do material compósito	29
4.2.3 Fabricação do material compósito	30
4.2.4 Confecção dos corpos de prova	33
4.2.5 Ensaio de densidade volumétrica	33
4.2.6 Ensaio de tração uniaxial	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Ensaio de densidade volumétrica	37
5.2 Ensaio de tração uniaxial	38

5.2.1 Desempenho mecânico na tração uniaxial para os CPs PRFV.....	38
5.2.2 Desempenho mecânico na tração uniaxial para os CPs PRFV+1%	40
5.2.3 Desempenho mecânico na tração uniaxial para os CPs PRFV+1,5%	42
5.2.4 Comparativo – Influência do percentual das cinzas da <i>Eichhornia crassipes</i>	44
6 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e desenvolvimento da tecnologia, novos materiais são requisitados para diversos tipos de aplicações diferentes, materiais com alta resistência e baixo peso são excelentes para desenvolvimento de várias peças com diversas aplicações como, por exemplo, artigos esportivos, estruturais, tubulações e automobilísticos.

Segundo Moreira (2009), a grande variedade de materiais atualmente disponíveis para engenharia é o motivo pelo qual cada vez mais materiais especiais são usados para aplicações específicas. Os compósitos representam um caso particularmente importante entre os chamados materiais de engenharia não tradicionais (Moreira, 2009).

Os compósitos são constituídos por duas fases, denominadas de fase reforço e fase matriz. O reforço no material compósito tem como função suportar os esforços mecânicos, enquanto a matriz tem a função de transferir os esforços mecânicos externos para o reforço (Melo, 2013).

Alguns dos materiais compósitos usa como reforço algumas substâncias orgânicas/naturais, visando o aproveitamento de materiais que seriam descartados, dessa forma, diminuindo a poluição. Um elemento indispensável para a sobrevivência de todos os seres vivos é a água, logo deve-se procurar meios de evitar/diminuir a poluição desse elemento.

Sabe-se que a água é essencial para a sobrevivência das espécies e que em caso de poluição da água, ocorre a perda de qualidade, tornando-a imprópria para as espécies nativas e para o homem, causando danos que podem ser irreversíveis (Martins, 2014). Logo, a poluição da água afeta as comunidades biológicas causando mudanças na qualidade ambiental. De acordo com Rodrigues *et al.* (2016), a poluição da água por metais pesados é uma grande preocupação para entidades governamentais e para o público em geral devido ao seu alto potencial de toxicidade para todos os organismos e para o meio ambiente.

As macrófitas aquáticas são plantas desempenham várias funções nos ecossistemas, incluindo sua capacidade de absorver o excesso de nutrientes e poluentes da água por meio de um processo chamado fitorremediação (Hegel; Melo,

2016). As macrófitas têm sido estudadas como alternativa para a restauração desses ambientes devido às suas propriedades benéficas do processo (Rodrigues *et al.*, 2016).

Apesar de todos os benefícios que as macrófitas aquáticas apresentam por meio da fitorremediação, algumas espécies apresentam um crescimento descontrolado devido a quantidade excessiva de nutrientes/poluentes absorvidos, o que causa diversos problemas para a ambiente aquático, tanto para os seres vivos daquele habitat, como também para os seres humanos (Spósito, 2018).

Como todo ser vivo, as macrófitas aquáticas chegam ao fim da vida e caso não sejam retiradas da água antes disso, geram um excesso de biomassa nesses ambientes aquáticos, causando diversos problemas ao longo do ciclo de vida das plantas e após o seu final, como dificuldade de navegação com o excesso do crescimento e poluição da água devolvendo todos os nutrientes que foram absorvidos quando chegam a fim da vida.

Sabendo disso, este trabalho propõe a utilização dessas plantas para desenvolvimento de um material compósito, constituído por resina poliéster, fibra de vidro e as cinzas de *Eichhornia crassipes*, uma espécie de macrófita aquática, visando a redução da poluição do meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Neste trabalho a proposta foi fabricar um material compósito constituído por resina poliéster com as cinzas de macrófitas aquáticas da espécie *Eichhornia crassipes* e fibra de vidro, com o objetivo de quantizar os efeitos que a adição das cinzas irão causar nas propriedades mecânicas no compósito fabricado.

2.2 Objetivos específicos

- Aplicar a biomassa produzida na fitorremediação em um compósito, finalizando o ciclo de recuperação ambiental com destinação da biomassa produzida.
- Confeccionar um compósito reforçado com fibra de vidro adicionando cinzas de macrófitas aquática da espécie *Eichhornia crassipes*.
- Realizar ensaio de tração uniaxial tendo como referência a norma ASTM D3039 (2017).
- Realizar ensaio de densidade volumétrica tendo como referência norma ASTM D792 (2008).
- Avaliar a influência da adição das cinzas da *Eichhornia crassipes* nas propriedades mecânicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Macrófitas aquáticas

Os diversos estudos feitos no decorrer dos últimos anos sobre as macrófitas aquáticas confirmam sua veracidade na eficiência do tratamento de efluentes, isso ocorre devido à alta capacidade de absorverem nutrientes e sua alta taxa de produção primária (Henry-Silva; Camargo, 2002).

As macrófitas aquáticas são tidas como a vegetação visível a olho nu, onde suas partes fotossintetizantes são flutuantes ou estão total ou parcialmente submersas, em água doce ou salobra (Neto; Souza, 2022).

Martins *et al.* (2002) destaca as seguintes espécies de macrófitas aquáticas: *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Eichinochloa polystachya*; o mesmo autor também afirma que as macrófitas aquáticas flutuantes são o problema mais sério e generalizado em todo o mundo, pois frequentemente apresentam reprodução vegetativa rápida, independente de estruturas reprodutivas sexuadas, grandes áreas de tecido fotossintético proporcional ao comprimento da planta e capacidade de ocupar locais rapidamente.

Neste trabalho a macrófita aquática a ser utilizada é a da espécie *Eichhornia crassipes*, a qual será mais detalhada no tópico 3.1.1.

3.1.1 *Eichhornia crassipes*

A macrófita aquática da espécie *Eichhornia crassipes* (Figura 1) é atualmente uma planta cosmopolita, seu local de origem é a América do Sul, mas devido à beleza da planta, principalmente das flores, foi rapidamente introduzida em diferentes partes do mundo e acabou se tornando a planta invasora mais séria no ambiente aquático (Martins; Pitelli, 2005).

A *Eichhornia crassipes* tem a capacidade de desenvolver sua massa verde 15% ao dia, a cada seis ou setes dias o seu tamanho chega a dobrar, acumulando 800 kg por hectare por dia (Alves *et al.*, 2003).

Figura 1 - Macrófita aquática da espécie *Eichhornia crassipes*.



Fonte: <https://www.fazendasubmersa.com.br/plantas-aquaticas/plantas-chacara-takeyoshi/eichhornia-crassipes-aguape>.

A complexidade estrutural das folhas e raízes das macrófitas aquáticas servem de abrigo ou alimento para diversos organismos daquele hábitat em que está localizada, como peixes, insetos e outros; uma espécie de macrófita aquática que se destaca devido a sua densa massa de raízes (Lopes *et al.*, 2011).

Apesar de serem importantes no tratamento de efluentes, diversos problemas podem ser causados pelo crescimento descontrolado das macrófitas aquáticas, como a dificuldade de navegação, redução na produção pesqueira (Henry-Silva; Camargo, 2005).

A *Eichhornia crassipes*, como outras macrófitas aquáticas, são capazes de remover poluentes das águas através de uma técnica chamada de fitorremediação, a qual será mais detalhada no tópico seguinte.

3.1.2 Fitorremediação

Uma das técnicas de biorremediação é a fitorremediação (*fito* = planta e *remediação* = remediar, corrigir), uma tecnologia que emprega plantas com a função de extrair, degradar ou imobilizar contaminantes do solo e água (Vasconcellos; Pagliuso; Sotomaior, 2012).

As macrófitas aquáticas que se desenvolvem sobre a superfície da água tem suas raízes submersas, sendo capazes de retirar os nutrientes da água, dessa forma o

seu crescimento é intenso em áreas eutrofizadas; as macrófitas aquáticas da espécie *Eichhornia crassipes* destacam-se dentre as demais por apresentar uma ótima capacidade de absorver nutrientes e metais tornando-se assim uma espécie vista como despoluidora de água (Palma-Silva, 2012).

No desenvolvimento de métodos para a descontaminação de áreas ambientais poluídas por compostos orgânicos, tem-se buscado soluções com eficiência, simplicidade na sua execução, menor custo e tempo demandado para o processo (Pires *et al.*, 2003). Estes autores afirmam que a biorremediação tem sido um dos métodos mais visados como solução, por apresentarem a capacidade de descontaminação de solo, água e ar por meio de organismos vivos, como as plantas.

É importante ressaltar que além de todos os benefícios provocados pelas macrófitas aquáticas através da fitorremediação, elas também causam inúmeros problemas, dentre eles o excesso de biomassa produzida ao fim da vida. Dessa forma é viável procurar meios de aproveitamento dessa biomassa produzida em excesso. Nesse contexto, este trabalho propõe o uso dessa biomassa como reforço na fabricação de um material compósito.

3.2 Materiais compósitos

A adoção do compósito como uma classe de material distinta ocorreu na metade do século XX através da fabricação de compósitos multifásicos desenvolvidos por engenheiros (Callister; Rethwisch, 2018). Segundo os autores, inúmeras aplicações de alta tecnologia apresentadas nas indústrias aeroespacial, submarina, transporte e outras, necessitam de materiais que apresentem propriedades específicas.

Essas propriedades específicas, que não são encontradas nos seus materiais constituintes de forma isolada, são possíveis de se obter devido as características do material compósito, que é definido como a mistura de dois materiais distintos quimicamente entre si, possuindo uma interface que separa seus componentes (Vieira; Vieira; Carvalho, 2016).

Na busca de materiais que atendam às exigências necessárias para um bom desempenho na sua aplicação de acordo com as suas propriedades, novos meios de

produção e fabricação são desenvolvidos, logo, os compósitos se enquadram pois apresentam ótimas características como: alta resistência mecânica com boa ductilidade, boa estabilidade dimensional e em casos particulares apresenta uma tenacidade superior com incorporação de cargas (Freire *et. al*, 2013).

A Norma ASTM D3878 - 20b (2020) define o compósito como uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis uns nos outros, sendo combinados com a finalidade de formar um material útil e de propriedades únicas, não possuídas por seus constituintes de forma isolada.

De acordo com Vieira, Vieira e Carvalho (2016), a qualidade de um compósito e características que vão influenciar diretamente no seu desempenho é o tipo, quantidade e orientação das fibras usadas como reforço e o nível de aderência entre os materiais utilizados, quanto melhor a aderência, melhor será o resultado final.

As propriedades dos compósitos vão ser diretamente influenciadas pela classificação.

3.2.1 Classificação dos compósitos

Para se obter as propriedades desejadas em um compósito, dois ou mais materiais são combinados, o compósito gerado dessa combinação pode ser classificado de acordo com as características das fases constituintes, sendo elas: a fase matriz e a fase reforço.

A fase matriz pode ser constituída por diferentes tipos de materiais, como metal, polímeros ou materiais cerâmicos, ela envolve a fase reforço, dessa forma dando uma geometria para o compósito e preenchendo os espaços vazios do reforço, sem movimentá-los (Ventura, 2009).

De acordo com Poletto (2017), a fase matriz é responsável pela forma estrutural do compósito, que transfere as tensões mecânica para o reforço além de isolar as fibras ou partículas para que possam agir de forma individual, reduzindo a possibilidade de trincas e aumentar o acabamento superficial.

As matrizes poliméricas são divididas em dois grupos, matrizes termofixas e matrizes termoplásticas. A principal diferença entre esses grupos é a força de intensidade de ligação entre as macromoléculas, onde a termofixa e termoplástica

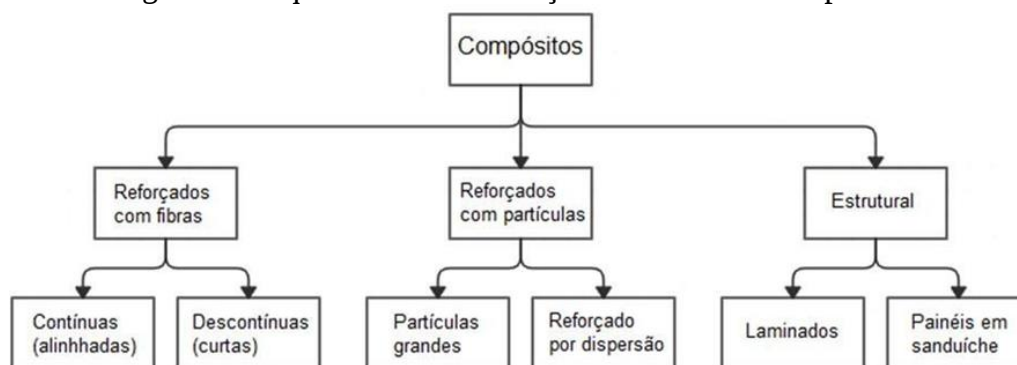
apresentam uma alta e baixa força, respectivamente; uma característica importante de se observar é que as matrizes termoplásticas apresentam um baixo ponto de fundição, sendo possível ocorrer apenas com um leve aquecimento (Batista, 2013).

Já o reforço é o constituinte responsável pelo aumento da rigidez ou resistência do compósito, suas propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas são elevadas com a adição do reforço, tendo como sua principal finalidade resistir aos carregamentos mecânicos que forem submetidos ao material (Silva, 2020).

Os reforços estão divididos em dois grupos, os naturais e os sintéticos; os reforços naturais podem ser vegetais, animais ou minerais, já os reforços sintéticos são fabricados através de inúmeras fases de processamento e apresentam diversificadas propriedades, é importante salientar que, uma resistência mais elevada será obtida quanto maior for o comprimento e diâmetro do reforço sintético (Matthews; Rawlingg, 1999 *apud* Silva, 2019).

A classificação do compósito pode se dá pelo tipo de reforço que é utilizado, Callister e Rethwisch (2018) apresentam os seguintes tipos mostrados na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de classificação de materiais compósitos.



Fonte: Adaptado Callister; Rethwisch (2018).

Neste trabalho os principais tipos de classificação utilizada é o reforço com fibras e reforço com partículas, que serão mais detalhados a seguir.

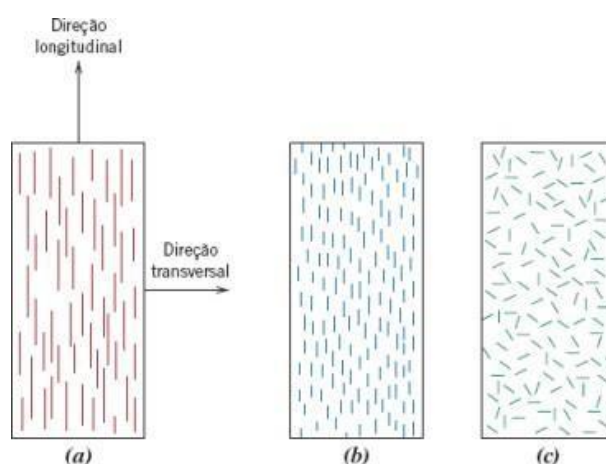
3.2.2 Compósitos reforçados com fibras

A utilização dos reforços fibrosos se dá devido ao fato deles apresentarem uma ótima melhoria nas propriedades do compósito, como aumentar a rigidez e a resistência mecânica da matriz, além de conceder uma boa estabilidade dimensional e boa performance em altas temperaturas (Freire *et. al*, 2013).

De acordo com Marin (2016), um fator de grande influência nas características mecânicas do compósito, além das propriedades das fibras, é o comprimento crítico das fibras, onde frequentemente para as uniões matriz – fibra, este comprimento crítico é por volta de 1 mm, sendo de 20 a 150 vezes maior que o diâmetro da fibra. Fibras que apresentam um comprimento 15 vezes maior que o comprimento crítico, são consideradas fibras contínuas (Marin, 2016).

É importante lembrar que as propriedades do compósito vão variar de acordo com a forma que as fibras estão dispostas, ou seja, propriedades anisotrópicas, são dependentes da direção da fibra ao longo de sua composição, como mostrado na Figura 3 (Callister; Rethwisch, 2018).

Figura 3 - Representações esquemáticas da organização das fibras em compósitos (a) contínuas e alinhadas (b) descontínuas e alinhadas (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.



Fonte: Callister; Rethwisch (2018).

Um dos reforços fibrosos mais utilizados, é a fibra de vidro, que será mais detalhada no tópico seguinte.

3.2.2.1 Compósitos reforçados com fibras de vidro

As fibras de vidro têm um grande destaque no mercado e na indústria devido ao seu ótimo custo-benefício, a mesma é uma das mais utilizadas para reforço de materiais compósitos (Ota, 2004). Compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro são comumente chamados de PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro).

De acordo com Oliveira (2013), as fibras de vidro se destacam das demais devido às suas ótimas características como o baixo coeficiente de dilatação térmica, boas propriedades mecânicas, baixo peso e custo menor que o de outras fibras sintéticas.

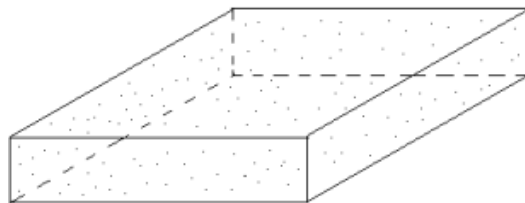
Moreira (2009) descreve o processo de fabricação da fibra de vidro da seguinte forma: Um conjunto de tubulações levam o vidro fundido para fieiras, com uma temperatura por volta de 1250°C, possibilitando o seu escoamento por gravidade, dando origem aos fios que possuem alguns décimos de milímetros, essas fibras são resfriadas na saída das fieiras, primeiro por radiação e logo em seguida por borrifação de água.

De acordo com Silva (2014), as fibras de vidro são divididas em quatro tipos, de acordo com a sua composição, sendo eles A, E, S e R. A fibra do tipo E apresenta baixo teor alcalino, são predominantes em compósitos com matriz polimérica devido às suas altas propriedades de isolamento elétrico e mecânicas, tem substituído bastante o tipo A por serem fortemente alcalinas; já a fibra de vidro S, é a que apresenta o maior custo, a mesma é caracterizada por uma boa resistência ao calor, à tração e um alto módulo de Young; As do tipo R, apresentam melhor resistência química (Silva, 2014).

3.2.2.2 Compósitos reforçados com partículas

Os compósitos reforçados com partículas (Figura 4), podem ser divididos em dois grupos, sendo eles: compósitos com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão.

Figura 4 - Representação de compósito particulado.



Fonte: Diaceno (2010).

Segundo Callister e Rethwisch (2018), a maior diferença entre eles está relacionada com o mecanismo de aumento da resistência, nos compósitos com partículas grandes, o termo *grande* significa que a interação matriz – partícula não chega a nível atômico, ao contrário dos compósitos por dispersão, onde as partículas podem chegar a ter diâmetros de 0,01 a 0,1 μm , tornando possível uma interação matriz – partícula a nível atômico ou molecular.

As forças intersticiais microscópicas são diretamente afetadas pela forma, tamanho e densidade/porosidade das partículas, pode-se citar o exemplo de nano partículas, as mesmas são capazes de preencher espaços intersticiais deixados por micropartículas, dessa forma proporcionando uma melhor distribuição e englobamento das partículas no sistema, sendo possível obter melhores propriedades mecânicas no compósito (Estevez *et al.*, 2013 *apud* Abreu Júnior, 2015).

Já os compósitos reforçados com partículas grandes, não podem ser abordados com interação atômica ou molecular, para esses é aplicada a teoria da mecânica do contínuo, um ótimo exemplo de compósito com partículas grandes é o concreto, constituído pelo cimento (matriz) e areia e brita (reforço particulado) (Diaceno, 2010).

Os materiais compósitos também podem ser fabricados utilizando os dois tipos de reforços, partículas e fibras, sendo denominados de compósitos híbridos. No tópico seguinte será apresentado mais características sobre os compósitos híbridos.

3.2.3 Compósitos híbridos

Os compósitos híbridos são cada vez mais comuns e normalmente consistem em múltiplas camadas, com ou sem a mistura de vários tipos de fibras (Fontes, 2013).

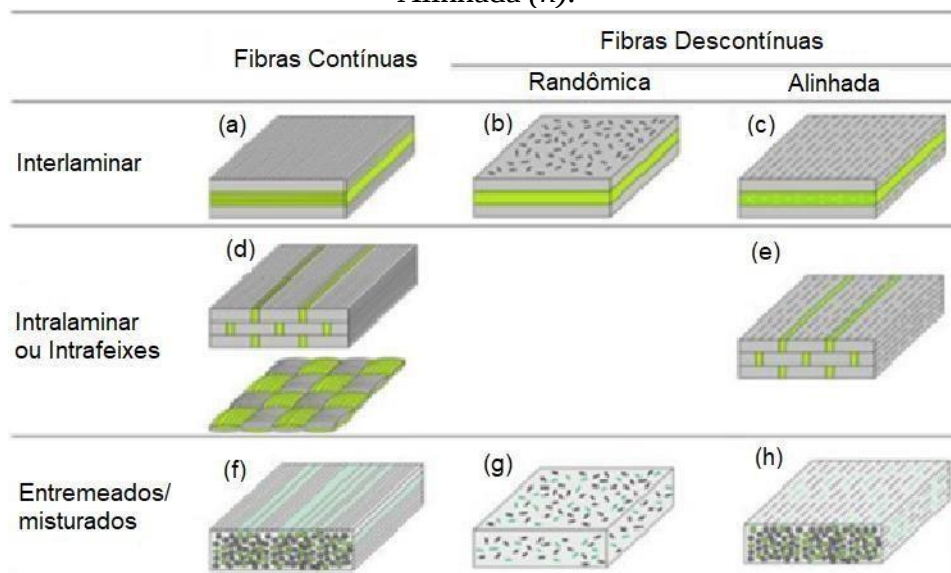
A estrutura dos compósitos híbridos é constituída por uma série de tipos de reforços diferentes, formada por fibras e partículas no mesmo material ou pela combinação de mais de um tipo de fibra ou de partícula no mesmo material (Barros, 2006).

De acordo com Silva (2008) os compósitos de fibras naturais são bastante visados devido a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, possuindo boas características ao ponto de substituir algumas fibras sintéticas, como a de fibra de vidro; ele ainda afirma que a fibra de vidro é uma ótima opção para produção de um compósito híbrido constituído por fibra natural e a fibra de vidro, além de apresentar boas características mecânicas e baixo custo, serve como uma barreira química que previne o contato das fibras naturais com a água, assim diminuindo a absorção de umidade.

Os compósitos híbridos são produzidos utilizando diferentes reforços ou diferentes matrizes, no mesmo compósito. Existe inúmeras possibilidades de combinações fibra/matriz para fabricação de um compósito híbrido, para Silva (2022), os compósitos híbridos podem ser divididos nos seguintes grupos (Figura 5).

- Interlaminares: a hibridização ocorre durante o empilhamento das lâminas no momento da fabricação, as fibras podem ser contínuas (Figura 5 (a)), descontínua randômica (Figura 5 (b)) e descontínua alinhada (Figura 5 (c)).
- Intralaminar ou Intrafeixes: a hibridização ocorre no momento da tecelagem do tecido, as fibras podem ser contínuas (Figura 5 (d)) e descontínua alinhada (Figura 5 (e)).
- Entremeados/misturados: a hibridização ocorre por meio da mistura das fibras diferentes, mas as fibras não são em formato de tecido, as fibras podem ser contínuas (Figura 5 (f)), descontínua randômica (Figura 5 (g)) e descontínua alinhada (Figura 5 (h)).

Figura 5 - Principais configurações de compósitos híbridos: Interlaminares: Fibras contínuas (a), Randômica (b) e Alinhada (c); Intralaminar ou Intrafeixes: Fibras contínuas (d) e Alinhada (e); Entremeados: Fibras contínuas (f), Randômica (g), Alinhada (h).



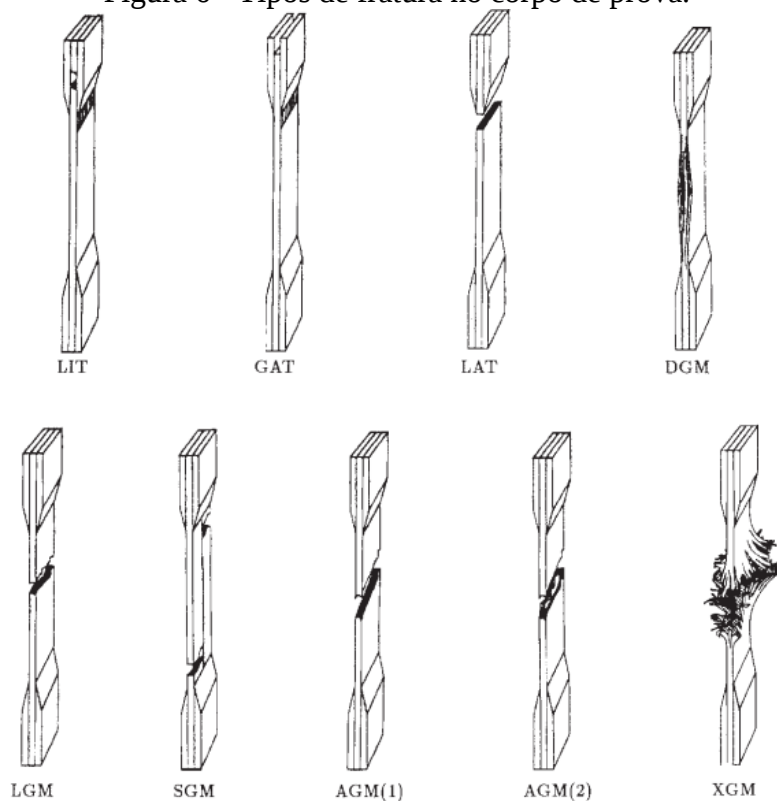
Fonte: Adaptado de Silva (2022).

3.2.4 Ruptura

A falha no compósito pode ocorrer por causa de diversos mecanismos diferentes, a adesão fibra-matriz é conhecida como resistência aparente ao cisalhamento interfacial, quando essa resistência ultrapassa seu limite ocorre a falha do material, ou seja, quando a tensão aplicada excede a força de interface, faz com que as fibras se desloquem ou até mesmo quebrem (Pereira, 2021).

De acordo com a norma ASTM D3039 (2017), existe mais de um tipo de falha que pode ocorrer no corpo de prova, como apresentado da Figura 6.

Figura 6 - Tipos de fratura no corpo de prova.



Fonte: ASTM D3039 (2017).

Sendo os dois primeiros: LIT e GAT (Figura 6), tipos de fraturas não válidas para o ensaio de tração uniaxial de acordo com a norma ASTM D3039 (2017). O quadro 1 descreve o significado de cada sigla e tipo de fratura.

Quadro 1 - Definição dos tipos de falhas.

Tipo	Definição
LIT	Lateral dentro da lingueta da garra.
GAT	Desaderência da lingueta na garra superior.
LAT	Lateral na base da lingueta da garra superior.
DGM	Delaminação na borda do corpo de prova e no meio do galgo.
LGM	Lateral e no meio do galgo.
SGM	No meio do galgo com fendas longitudinais.
AGM	Angular e no meio do galgo.
XGM	Explosiva e no meio do galgo.

Fonte: Adaptado de Lima (2022).

3.2.5 Processos de fabricação dos compósitos

De acordo com Orth, Baldin e Zanotelli (2012) os processos de produção do PRFV podem ser divididos em dois grupos, sendo, moldagem aberta tendo como exemplo os métodos *Hand Lay-up* e *Spray-up*, e, moldagem fechada com os processos de *Resin Transfer Molding*, *Sheet Molding Compound* e *Bulk Molding Compound*. Neste trabalho foi utilizado o método *Hand Lay-up*.

O método de *Hand Lay-up* é considerado o processo de fabricação de compósitos mais antigo, sendo aplicado na produção de vários materiais específicos como peças de aviões e na indústria naval, até materiais do dia a dia como saunas e banheiras (Ferreira, 2017). O processo de *Hand Lay-up* consiste na preparação de um molde previamente coberto com gel/desmoldante e inicia o processo de aplicação das fibras que serão utilizadas como reforço junto da resina que será utilizada, para melhor dispersão da resina sobre as fibras pode ser utilizado um rolo sulcado ou liso e em seguida o laminado deve ser deixado em repouso para cura (Ferreira, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Materiais utilizados na confecção dos compósitos

Os seguintes materiais foram utilizados para a confecção dos compósitos híbridos:

➤ Matriz

Resina poliéster transparente e catalizador MASSA FIX fabricado pela ROYAL QUIMICA.

➤ Reforços

Cinzas da *Eichhornia crassipes* que foi obtida através da calcinação de plantas que foram coletadas no trecho do rio Apodi/Mossoró localizado no município de Mossoró-RN e dez camadas de fibra de vidro, dispostas no mesmo sentido direcional.

4.1.2 Vidrarias e utilitários

Todas as vidrarias e utilitários utilizados nesse trabalho, são itens comuns de laboratório de química e engenharia mecânica, sendo eles: Capsulas de porcelana, dessecador, bastão de vidro, potes plásticos, capela de exaustão, lixas d'água e pinça. Além de espaçadores de 0,1mm e 2,2 mm.

4.1.3 Equipamentos

No Quadro 2 estão listados todos os equipamentos utilizados para a realização das análises e caracterizações deste trabalho, seguido pela marca e modelo.

Quadro 2 - Equipamentos utilizados.

Item	Equipamentos	Marca/Modelo
1	Forno tipo Mufla	NOVUS/N1200
2	Balança analítica	SHIMADZU/AUY220
3	Balança digital de cozinha	TOMATE/SF-400
4	Máquina de ensaio de tração universal	EMIC DL-10000
5	Paquímetro analógico	MITUTOYO
6	Micrômetro digital	DIGIMESS
7	Esmerilhadeira	BOSCH GWS 700
8	Estufa	SOLAB / SL-100

Fonte: Autor.

4.2 Métodos

Neste trabalho foi analisado a influência do percentual da cinza da *Eichhornia crassipes* nas propriedades mecânicas do compósito híbrido com fibra de vidro, através do ensaio de tração uniaxial e ensaio de densidade, para a caracterização física. É necessário destacar que todo processo apresentado a seguir da coleta das plantas e produção das cinzas, foram realizados por Freitas (2018) e Silva (2020).

Em posse das cinzas da *Eichhornia crassipes* foram fabricadas três placas de compósitos, sendo duas placas de compósitos híbrido:

- 1 Placa de fibra de vidro e resina poliéster.
- 1 Placa de fibra de vidro com 1 % de cinza da *Eichhornia crassipes* e resina poliéster.
- 1 Placa de fibra de vidro com 1,5 % de cinza da *Eichhornia crassipes* e resina poliéster.

Destaca-se que o percentual de cinza da *Eichhornia crassipes* foi em relação a massa de resina.

O tempo de gel foi ajustado para ficar entre 20 e 25 minutos para melhor desenvolvimento do processo, com isso a concentração de catalizador para cada placa de compósito foi diferente, sendo de 0,8 % para placa de resina pura, 1,2 % para a placa com 1 % de adição das cinzas da *Eichhornia crassipes* e 1,5 % para a placa com 1,5 % de

adição das cinzas da *Eichhornia crassipes*. Foi observado que a adição das cinzas aumentava o tempo de gel, logo para manter um tempo de gel dentro da média desejada foi realizado alguns testes, obtendo os valores citados anteriormente para concentração de catalizador em relação a quantidade de resina para cada placa.

Após a confecção das placas foram produzidos os corpos de prova para o ensaio de tração tendo como referência a norma ASTM D3039 (2017) e para o ensaio de densidade, tendo como referência a norma a norma ASTM D792 (2008). Cada etapa será detalhada a seguir.

4.2.1 Processamento da *Eichhornia crassipes*

Destaca-se que as cinzas das macrófitas utilizadas foram obtidas por Freitas (2018). A autora descreve que foram realizadas um total de quatro coletas em um trecho do Rio Apodi/Mossoró que atravessa a cidade de Mossoró-RN (Figura 7 (A)); a escolha do local foi feita considerando a grande quantidade da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* presente no local e a facilidade de acesso ao mesmo; escolheu de forma aleatórias plantas que estavam a margem do rio (Freitas 2018).

Após a coleta, as plantas foram lavadas (Figura 7 (B)) com água da torneira com a finalidade de retirar todas as impurezas presentes nas plantas e foram enxaguadas com água destilada; logo em seguida, foram secadas com papel toalha e submetidas ao processo de desidratação a 70° C em uma estufa com circulação forçada de ar até atingir uma desidratação completa (Figura 7 (C)); após esse processo, as plantas foram trituradas em um liquidificador tradicional e armazenadas em potes de plástico (Freitas, 2018).

Para realização desse processo, foram preparadas capsulas de porcelana, lavando-as com água, sabão e uma solução de HCl 0,1 mol L⁻¹, enxaguadas com água destilada, e colocadas em forno tipo Mufla (Figura 7 (D)) a uma temperatura de 500°C por 3 horas; após esse processo, as plantas foram trituradas novamente em um liquidificador tradicional e calcinadas em forno Mufla, esse processo seguiu as normas do método de digestão seca no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (Silva, 2009), e foi realizado por Freitas (2018).

Finalizado o procedimento de calcinação, retornou as amostras para o dessecador até atingir a temperatura ambiente e, em seguida foram trituradas utilizando

um almofariz com pistilo homogeneizando as amostras e alcançando o estado de cinzas desejado (Figura 7 (E)), as cinzas foram armazenadas em potes plásticos para futura aplicação na produção dos compósitos (Freitas, 2018).

Figura 7 – Fluxograma dos processos.



Fonte: Adaptado de Freitas (2018).

Por fim, através da Fluorescência de Raios – X, Freitas (2018) descobriu quais elementos estavam presentes na *Eichhornia crassipes* coletada e tratada, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Porcentagem dos elementos presentes na cinza da *Eichhornia crassipes*.

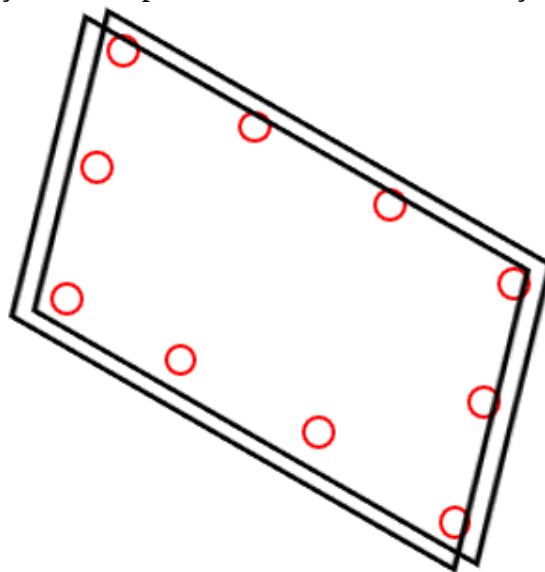
Elemento	Porcentagem
Cl	30,567 %
K	26,132 %
Ca	15,895 %
Mg	12,547 %
Na	7,188 %
P	5,384 %
Si	1,091 %
S	0,732 %
Mn	0,167 %
Sr	0,107 %
Fe	0,092 %
Br	0,046 %
Cu	0,021 %
Rb	0,018 %
Zn	0,012 %

Fonte Freitas (2018).

4.2.2 Fabricação do molde para confecção do material compósito

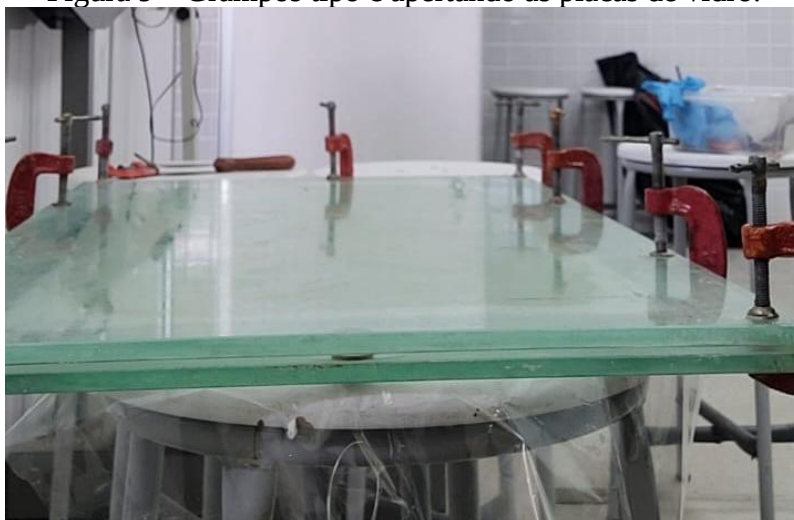
Um parâmetro desejado na fabricação das placas era que a espessura deveria possuir uma média de 2,5 mm (ASTM D3039, 2017). Para isso foram utilizadas duas placas de vidro (de 10 mm de espessura) como molde e um espaçador de 2,2 mm e três de 0,1mm, assim totalizando o valor da espessura desejada (Figura 8). Para melhorar a garantia da espessura das placas foram usados grampos tipo c (Figura 9) para apertar as placas onde estavam localizados os espaçadores. Os espaçadores foram distribuídos de forma mais uniforme possível e de modo que não entrasse em contato direto com o material compósito.

Figura 8 - Ilustração do das placas de vidro com distribuição dos espaçadores.



Fonte: Autor.

Figura 9 - Grampos tipo c apertando as placas de vidro.



Fonte: Autor.

4.2.3 Fabricação do material compósito

Para fabricação das placas foi utilizado o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*), esse procedimento foi realizado no laboratório de metalografia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas.

Dentre as três placas de compósito produzidas, duas apresentam duas fases de reforço (fibra de vidro e cinzas da *Eichhornia crassipes*), enquanto a outra foi produzida apenas com o tecido de fibra de vidro como reforço. Foi utilizado 10 camadas de tecido

de fibra de vidro em cada placa e proporções diferentes das cinzas da *Eichhornia crassipes* (0 %, 1 % e 1,5 %, em relação a massa da resina). A matriz escolhida foi a resina termofixa do tipo poliéster, por apresentar um bom custo-benefício e ser amplamente utilizada em PRFV.

Inicialmente preparou-se as duas placas de vidro, aplicando desmoldante AmberTech (Figura 10) na superfície do vidro, para facilitar na desmoldagem do material.

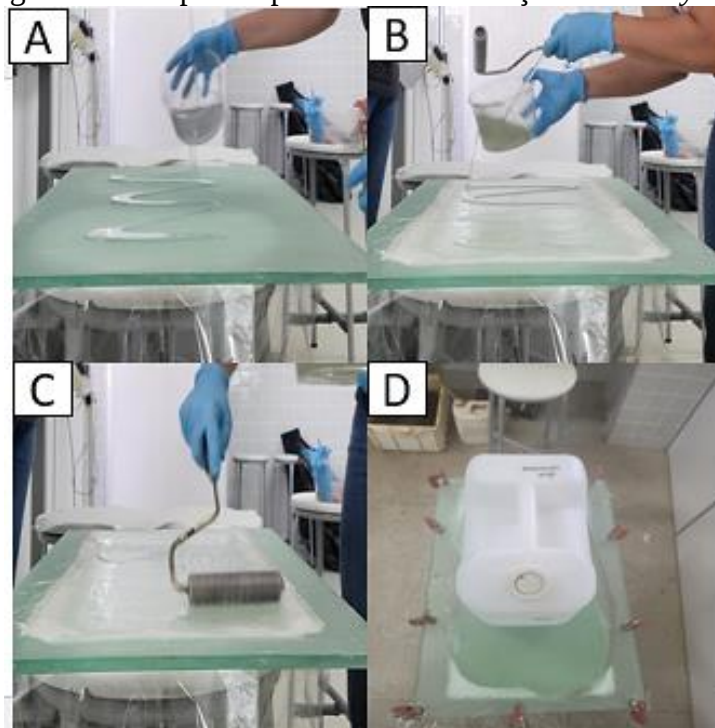
Figura 10 - Desmoldante.



Fonte: Autor.

Em seguida foi dado início ao processo de laminação manual (*Hand Lay-up*) (Figura 11). Inicialmente é adicionado uma camada de resina sobre a placa de vidro com o desmoldante e com auxílio de um rolo de metal espalhou de forma homogênea (Figura 11 (A)), em seguida adicionou-se a primeira camada do tecido de fibra de vidro e mais um pouco de resina (Figura 11 (B)), logo depois espalhou novamente de forma homogênea a resina no material com o auxílio do rolo de metal (Figura 11 (C)) e continuou esse procedimento até ser colocado todas as 10 camadas desejadas de fibra de vidro. Ao finalizar foram distribuídos os espaçadores responsáveis pela garantia da espessura desejada e logo depois colocou sobre o material a segunda placa de vidro, com os grampos tipo c para prender e apertar as placas e o galão de água para ajudar na distribuição da resina sobre todo tecido (Figura 11 (D)).

Figura 11 - Etapas do processo de laminação *Hand Lay-up*.



Fonte: Autor.

4.2.3.1 Fabricação da placa com fibra de vidro e resina pura

Para efeito de comparação tem-se a fabricação do compósito reforçado apenas com fibra de vidro. Inicialmente foi pesado 490 gramas de resina em um pote plástico e em seguida adicionou-se 0,8% do catalisador (114 gotas), misturou com auxílio de um bastão de vidro por aproximadamente 1 minuto e logo em seguida realizou o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*), com adição de 10 camadas de fibra de vidro, semelhante ao processo detalhado no subitem anterior. Após o processo de laminação o material permaneceu no processo de cura durante 24 horas. Concluída a cura, a placa foi desmoldada e foram confeccionados os corpos de prova.

4.2.3.2 Fabricação da placa com fibra de vidro e resina com adição das cinzas

Na fabricação das placas com a adição das cinzas da *Eichhornia crassipes* foi pesado em potes plásticos 482 gramas e 485 gramas de resina respectivamente para 1 % e 1,5 % de cinzas. Foi adicionado as seguintes concentrações de catalisador para cada placa 1,2 % (177 gotas) para a placa com 1 % de cinzas e 1,5 % (210 gotas) para a placa

com 1,5 % de cinzas. Primeiro foi misturado a resina e as cinzas, para homogeneizar e logo depois que foi adicionado o catalisador e misturado por aproximadamente 1 minuto, em seguida realizou o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*). Após a laminação o material permaneceu no processo de cura durante 24 horas. Concluída a cura, a placa foi desmoldada e foram confeccionados os corpos de prova.

Destaca-se que as cinzas da *Eichhornia crassipes* foram colocadas a 100° C na estufa e esfriada no dessecador antes de ser utilizada na laminação.

4.2.4 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados com uma esmerilhadeira equipada com disco de corte, com dimensões aproximadas de 300 mm de comprimento e 28 mm de largura.

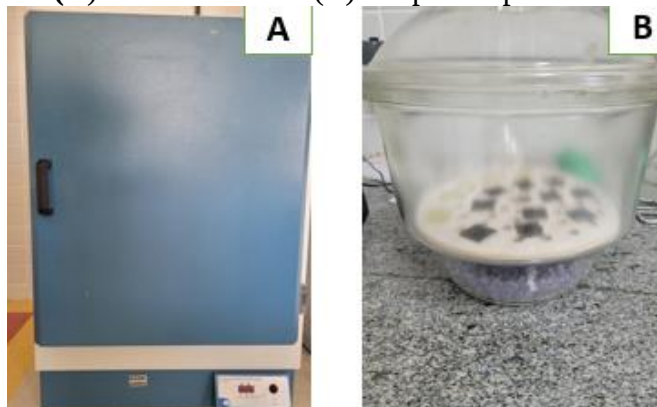
Para um melhor acabamento, após o corte, os corpos de prova passaram por um processo de lixamento manual, afim de diminuir as imperfeições e descontinuidades causadas durante o corte. Neste processo foram usadas lixas d'água de números 100 e 180 para retirada das rebarbas laterais, e em seguida lixas d'água de número 320, 400, 500 e 600 para acabamento. Finalizando todos os corpos de prova dentro das medidas da norma ASTM D3039 (2017) que especifica que o corpo de prova necessita ter largura de 25 mm com tolerância de $\pm 0,25$ mm e 250 mm de comprimento. Porém, devido a limitação da garra da máquina de ensaio de tração uniaxial foi utilizado um comprimento de 240 mm. O galgo dos corpos de prova foram de 127 mm.

4.2.5 Ensaio de densidade volumétrica

Para realização desse ensaio foram produzidos cinco corpos de prova de cada placa laminada, com dimensões aproximadas de 25 mm x 25 mm, com o objetivo de ter mais de 1g. O ensaio teve como referência a norma ASTM D792 (2008).

Antes de efetuar o ensaio, houve uma realização de preparação nos corpos de prova, que consistiu na realização de procedimento de secagem e esterilização durante período de uma hora e temperatura de 100° C, na estufa. Em seguida, foram retirados e colocados no dessecador para que pudessem esfriar (Figura 12).

Figura 12 - (A) Estufa utilizada (B) Corpos de prova no dessecador.



Fonte: Autor.

Após o procedimento de preparação dos corpos de prova, foi dado início as pesagens. Cada corpo de prova foi pesado seco e separadamente, utilizando uma balança analítica, em seguida foi feita a pesagem do afundador (feito com fio de cobre) parcialmente imerso na água, por fim foi realizada as pesagens do afundador junto de cada corpos de prova seguindo os procedimentos da norma ASTM D792 (2008). A pesagem que considera o afundador, juntamente, com o corpo de prova pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 - Pesagem do corpo de prova imerso na água.



Fonte: Autor.

O valor da densidade volumétrica é obtido por meio da equação 1, fornecida pela norma ASTM D792 (2008).

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

Onde: D é a densidade volumétrica do laminado (g/cm^3), a é massa do corpo de prova seco (g), b é a massa do corpo de prova mais 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 imerso na água (g).

4.2.6 Ensaio de tração uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039 (2002), no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFERSA, Campus Mossoró. Foi utilizado a máquina de ensaio universal (Figura 14), com célula de carga de 30 kN e velocidade de 2 mm/min, como sugerido pela norma ASTM D3039 (2017). Os corpos de provas foram preparados conforme procedimento descrito no subitem 4.2.7.

Figura 14 - Máquina de ensaio universal EMIC.



Fonte: <https://www.embracal.com/maquina-universal-ensaios-emic>.

Após a confecção os CPs foram divididos em três grupos e dada as nomenclaturas de acordo com a Quadro 3. Para todos os CPs foi realizado cinco medições de espessura utilizando um micrômetro digital e largura utilizando um paquímetro analógico.

Quadro 3 - 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%	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro com adição de 1 % das cinzas de <i>Eichhornia crassipes</i> .
PRFV+1,5%	Compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro com adição de 1,5 % das cinzas de <i>Eichhornia crassipes</i> .

Fonte: Autor.

Ao final dos ensaios foram obtidos os valores de tempo, força e deformação, que são fornecidos pela máquina utilizada. A partir desses valores foram calculados os valores de tensão última a tração, utilizando a equação 2:

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

Onde: F é a força fornecida pela máquina e A é a área média da seção transversal do corpo de prova.

Logo é possível calcular o módulo de elasticidade, para 50% da tensão última a tração de cada corpo de prova, utilizando a equação 3:

$$E = \frac{\tau}{\varepsilon} \quad (3)$$

Onde: τ é a variação da tensão e ε é a deformação, calculado pela equação 4:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Onde: ΔL é o valor da deformação fornecido pela máquina e L_0 é o valor do galgo (127mm).

O desvio padrão foi determinado com o Software do Microsoft Excel (2021) utilizando a função DESVPAD.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados deste trabalho, além das discussões e análises necessárias. Inicialmente, serão apresentados os resultados do ensaio de densidade volumétrica e logo em seguida os resultados da caracterização mecânica dos CPs que foram submetidos ao ensaio de tração uniaxial. No final deste tópico será apresentado um comparativo da influência do percentual das cinzas da *Eichhornia crassipes*.

5.1 Ensaio de densidade volumétrica

A Tabela 2 apresenta todos os resultados obtidos neste ensaio de acordo com a norma ASTM D792 (2008).

Tabela 2 - Densidade volumétrica das amostras.			
Densidade volumétrica (g/cm ³)			
Amostra	PRFV	PRFV+1%	PRFV+1,5%
1	1,6207	1,6301	1,6374
2	1,6193	1,6429	1,6447
3	1,6193	1,6372	1,6344
4	1,6318	1,6430	1,6362
5	1,6277	1,6263	1,6419
Média	1,6238	1,6359	1,6389
Desvio Padrão	0,0057	0,0075	0,0042

Fonte: Autor.

Com os valores obtidos para a média da densidade volumétrica (Tabela 2), nota-se que há um pequeno aumento no valor da densidade conforme é adicionado e aumentado a porcentagem das cinzas da *Eichhornia crassipes*. Freitas (2018) em seu trabalho obteve os seguintes valores de densidade média para um material de resina pura (RP), resina mais adição de 2,5 % das cinzas da *Eichhornia crassipes* (EC 2,5 %) e resina mais adição de 5% de cinzas de *Eichhornia crassipes* (EC 5%) respectivamente de 1,2270 g/cm³, 1,2354 g/cm³ e 1,2637 g/cm³.

Em comparação com o trabalho de Freitas (2018), que estudou um material de apenas resina poliéster e um compósito da mesma resina reforçado com cinzas de *Eichhornia crassipes* os valores da densidade volumétrica do presente trabalho são mais elevados, essa alteração está associada à adição da fibra de vidro que tem uma densidade de $2,55 \text{ g/cm}^3$ como apresentado no trabalho de Chawla (1998, *apud* Batista 2013), dessa forma elevando a densidade do compósito proposto.

O valor encontrado de $1,6238 \text{ g/cm}^3$ para PRFV está de acordo com trabalhos da literatura, citando como exemplo o trabalho de Silva *et. al* (2008), que encontrou um valor de $1,47 \text{ g/cm}^3$ para um laminado de sete camadas de manta de vidro com resina poliéster ortoftálica e Lima (2022), que encontrou o valor de $1,55 \text{ g/cm}^3$ para um laminado de uma camada de fibra de vidro e tendo como matriz a resina epóxi. Os valores baixos do desvio padrão podem estar associados a uniformidade dos corpos de prova.

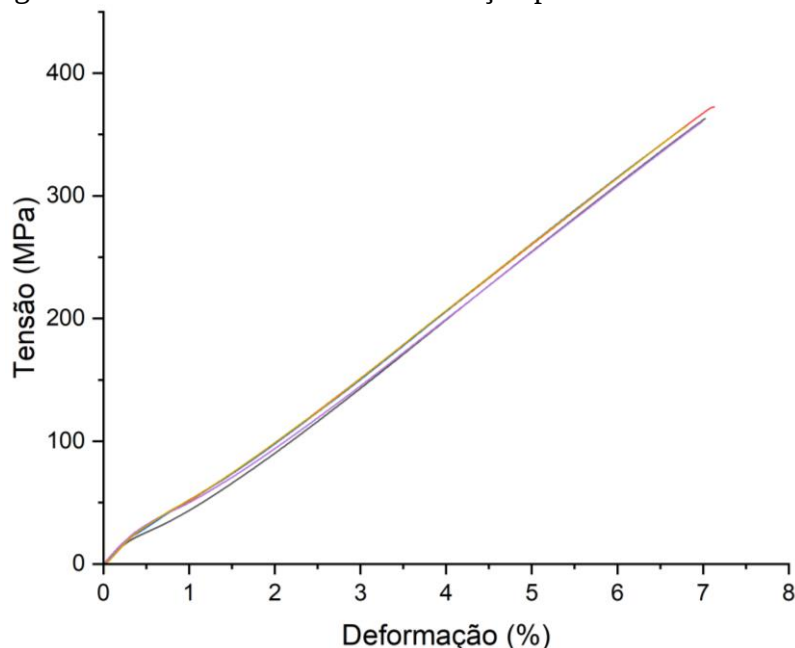
5.2 Ensaio de tração uniaxial

5.2.1 Desempenho mecânico na tração uniaxial para os CPs PRFV

O primeiro ensaio realizado foi o dos corpos de prova fabricados com resina poliéster e fibra de vidro, cujos resultados podem ser observados no gráfico Tensão x Deformação (Figura 15), onde apresenta as principais curvas dos valores de deformação e tensão, mostrando um comportamento aproximadamente linear indicando um comportamento frágil.

A Tabela 3 mostra os valores médios obtidos e os valores de desvio padrão, para deformação, tensão máxima e módulo de elasticidade.

Figura 15 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV.



Fonte: Autor.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV.

	Deformação (mm/mm)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	6,90	356,89	4,99
Desvio Padrão	0,22	11,23	0,13

Fonte: Autor.

Analizando a Figura 15 e Tabela 3, percebe-se um comportamento semelhante em todos os CPs durante a realização ensaio, gerando uma boa uniformidade das cinco curvas. Na tensão, deformação e no módulo de elasticidade é possível observar um valor de desvio padrão de 11,23 MPa, 0,22 mm/mm e 0,13 GPa respectivamente, podendo significar uma boa uniformidade dos corpos de prova.

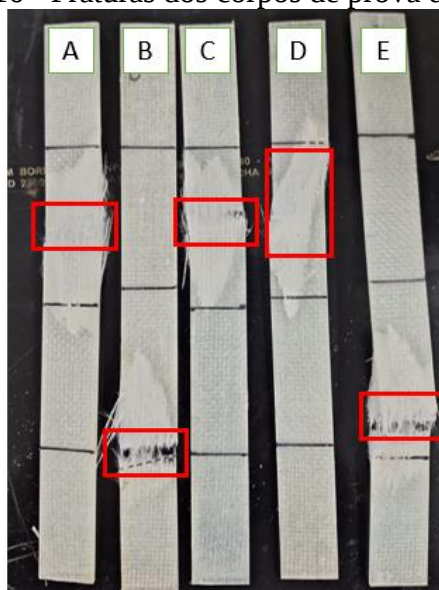
Silva (2008) que encontrou um valor entre 140MPa e 180MPa para a resistência à tração de um compósito fabricado com sete camadas de reforço com manta de fibras curtas de vidro e resina poliéster. Já Vieira, Vieira e Carvalho (2016) verificaram os seguintes valores para compósito fabricado com resina epóxi com duas e três camadas de reforço com manta de fibra de vidro, respectivamente, 48,24 MPa e 48,35 MPa. Destaca-se que os exemplos citados são com manta de fibra de vidro (fibras curtas), e, neste trabalho foi utilizado fibras contínuas.

Lima (2022) em seu trabalho estudou uma lâmina de fibra de vidro/epóxi e encontrou um valor médio de 136,89 MPa, 5,56 GPa e 2,91 %, para a resistência a tração, módulo de elasticidade e deformação a ruptura, respectivamente. Destaca-se que a lâmina do autor tem uma espessura de aproximadamente 0,42 mm e densidade de 1,55 g/cm³.

Na Figura 16 é possível fazer as análises macroscópicas das fraturas nos CP's de PRFV e defini-las de acordo com a norma ASTM D3039 (2017). Observa-se que a fratura ocorreu no galgo, tornando-as fraturas válidas.

É possível observar na Figura 16 e realizando a associação com os tipos de fraturas da norma ASTM D3039 (2017) mostrados na Figura 6 e quadro 1, percebe-se que ocorreram três tipos de fraturas, sendo elas: (A) LGM, (B) LAT, (C) LGM, (D) AGM, (E) LAT.

Figura 16 - Fraturas dos corpos de prova de PRFV.

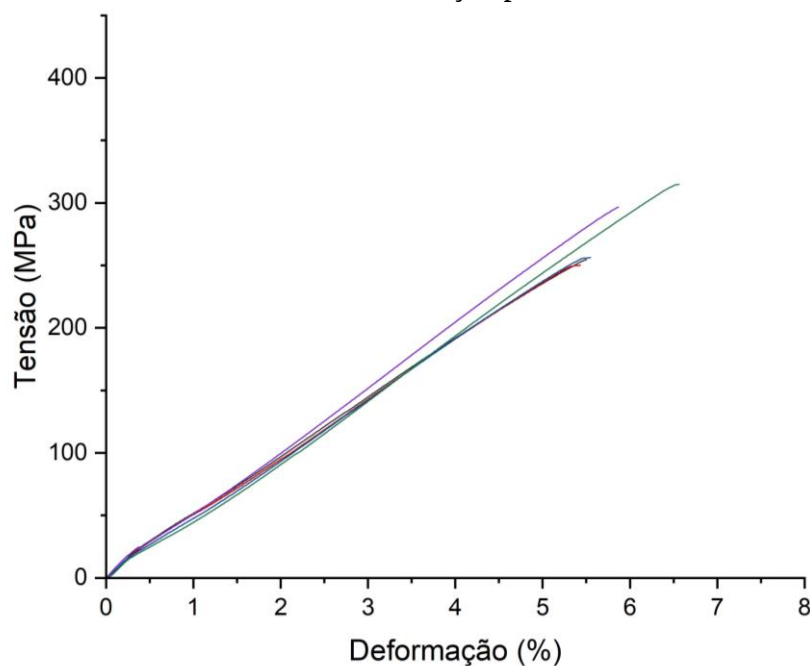


Fonte: Autor.

5.2.2 Desempenho mecânico na tração uniaxial para os CPs PRFV+1%

O segundo ensaio realizado foi o dos corpos de prova com adição de 1 % das cinzas de *Eichhornia crassipes*. A Figura 17 apresenta o gráfico obtido e a Tabela 4 tem-se os valores médios e de desvio padrão obtidos, para deformação, tensão máxima e módulo de elasticidade.

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



Fonte: Autor.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos CPs de PRFV+1%.

	Deformação (mm/mm)	Tensão máxima (Mpa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	5,85	277,36	4,76
Desvio Padrão	0,44	27,18	0,19

Fonte: Autor.

Inicialmente, analisando a Figura 17 percebe-se um comportamento aproximadamente linear das curvas com um pouco de desuniformidade nas curvas próximo ao ponto de ruptura do corpo de prova, além de notar também uma redução significativa na tensão, que é de 277,36 MPa comprando com a do PRFV que foi de 356,89 MPa.

Vale salientar que essas curvas não foram validadas por causa do local da ruptura dos corpos de prova. A falha ocorreu dentro da garra da máquina e não dentro do galdo definido, como mostra a Figura 18. O tipo de fratura característico que ocorreu nesses CP's de acordo com a norma ASTM D3039 (2017) é a fratura LIT.

Figura 18 - CPs de PRFV+1% após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor.

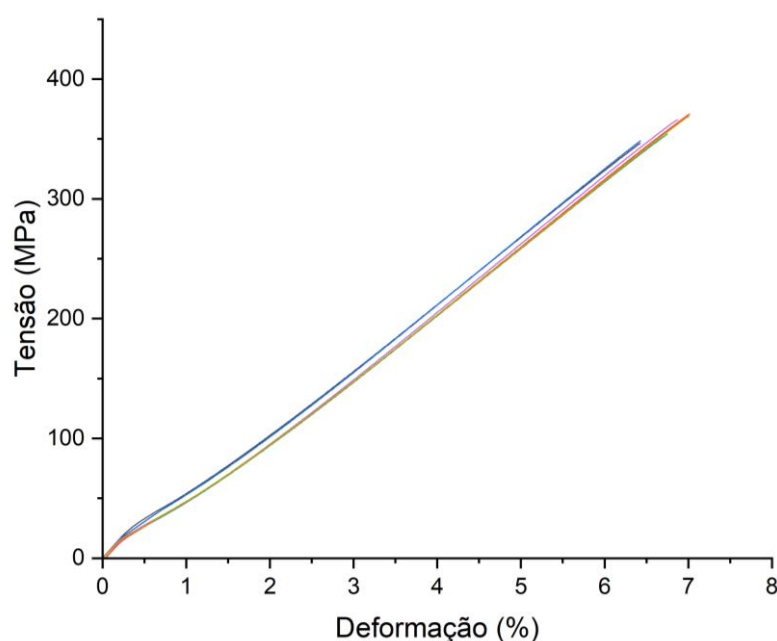
Dessa forma não foi possível validar o ensaio para os CPs de PRFV+1%. Essa falha pode ter sido ocasionada por diversos motivos, principalmente defeito relacionado a fabricação artesanal do compósito, como alguma fibra desalinhada, bolhas ou imperfeições que geraram pontos de concentração de tensão.

Analisando a Tabela 4, percebe-se que assim como nos corpos de prova de PRFV, os CPs PRFV+1% apresentaram valores de desvio padrão para tensão, deformação e módulo de elasticidade, sendo respectivamente 27,18 MPa, 0,44 mm/mm e 0,19 GPa.

5.2.3 Desempenho mecânico na tração uniaxial para os CPs PRFV+1,5%

O último ensaio realizado foi dos corpos de prova de com adição de 1,5 % de cinzas da *Eichhornia crassipes*. A Figura 19 mostra o gráfico Tensão x Deformação e a Tabela 5 os valores médios e os valores de desvio padrão obtidos, para deformação, tensão máxima e módulo de elasticidade.

Figura 19 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs de PRFV+1,5%.



Fonte: Autor.

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

	Deformação (mm/mm)	Tensão máxima (Mpa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	6,75	359,04	5,09
Desvio Padrão	0,27	10,83	0,10

Fonte: Autor.

Analizando o gráfico da Figura 19 pode-se realizar um comparativo com o gráfico do ensaio dos CPs de PRFV (Figura 15) e percebe-se um comportamento semelhante entre eles, tendo suas curvas um comportamento aproximadamente linear e ambos apresentam as cinco curvas uniformes.

Nota-se que a adição das cinzas não alterou os resultados para esse tipo de material submetido ao ensaio de tração uniaxial. No entanto, Freitas (2018) realiza a comparação entre um material de resina pura (poliéster) e um compósito de resina com a adição de 2,5 % de cinzas da *Eichhornia crassipes* e concluiu que houve perda das propriedades do material com a adição das cinzas.

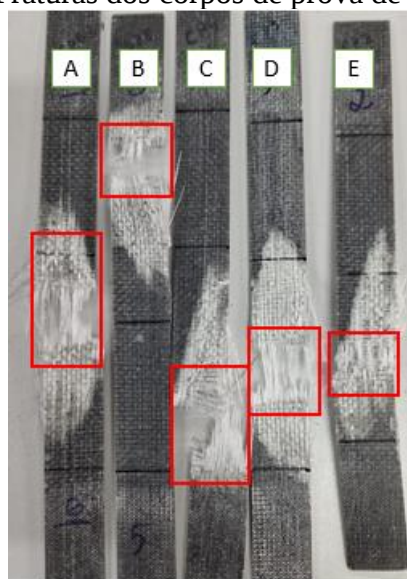
Em comparação com o trabalho de Freitas (2018), percebe-se que a adição das cinzas no PRFV ocasionou um leve aumento da tensão de ruptura média, ao contrário do resultado encontrado por Freitas (2018), onde a adição das cinzas ocasionou uma redução

significativa na tensão. Essa alteração pode ser associada a dois fatores, a porcentagem adicionada das cinzas e a adição de um novo reforço, a fibra de vidro. Freitas (2018) realizou estudos de um material de resina pura e um compósito de resina poliéster usando como reforço as cinzas de cinzas de *Eichhornia crassipes* nas porcentagens de 2,5 % e 5 %, neste trabalho foi realizado estudos de um material compósito de resina poliéster reforçado com dez camadas de fibra de vidro e um compósito híbrido de resina poliéster com adição de 1,5 % de cinzas de *Eichhornia crassipes* e dez camadas de fibra de vidro.

Na Figura 20 é possível fazer as análises macroscópicas das fraturas nos CPs de PRFV+1,5% e defini-las de acordo com a norma ASTM D3039 (2017). Observa-se que a fratura ocorreu transversalmente como esperado.

É possível observar na Figura 20 que ocorreram dois tipos de fraturas, sendo elas: (A) LGM, (B) LAT, (C) LAT, (D) LGM, (E) LGM.

Figura 20 - Fraturas dos corpos de prova de PRFV+1,5%.



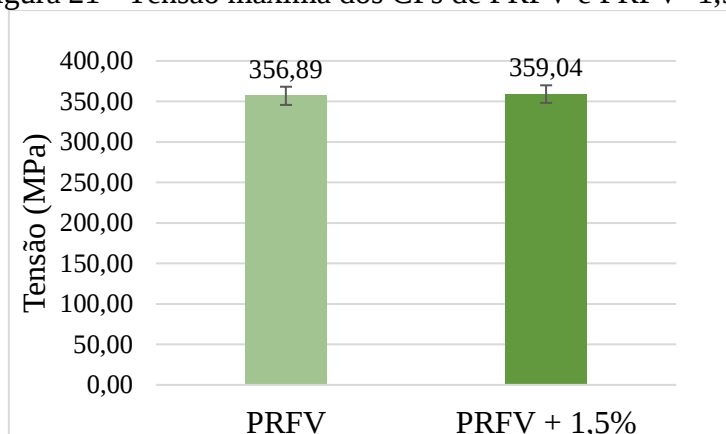
Fonte: Autor.

5.2.4 Comparativo – Influência do percentual das cinzas da *Eichhornia crassipes*

Pelos valores obtidos da Tabela 5, observa-se que a adição de cinzas gerou um pequeno aumento na tensão quando comparado com o corpo de prova de PRFV (Tabela 4), onde os CPs de PRFV+1,5% apresenta uma tensão de 359,04 MPa e os CPs de PRFV uma tensão de 356,89 MPa, como apresentado no gráfico da Figura 21. Continuando a

comparação das duas tabelas, percebe-se que o valores da média do desvio padrão da deformação e módulo de elasticidade estão próximos.

Figura 21 - Tensão máxima dos CPs de PRFV e PRFV+1,5%.

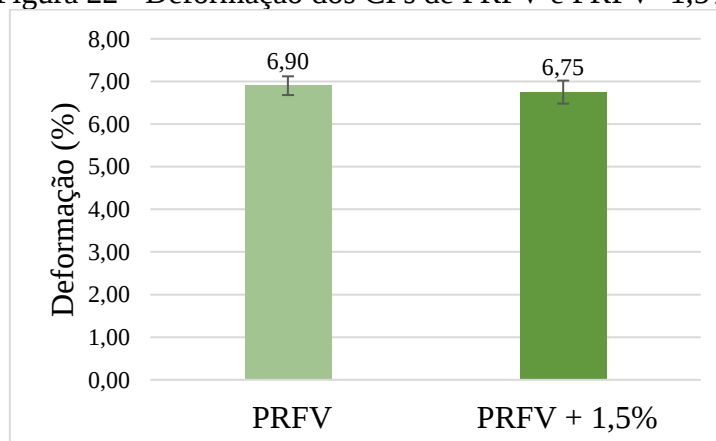


Fonte: Autor.

Com essa análise é possível dizer que apesar de não haver um aumento tão significativo na resistência, mas foi possível adicionar um poluente do meio ambiente no material sem comprometer as suas propriedades e ainda adicionar uma pigmentação.

O valor da média da deformação de 6,75 mm/mm do PRFV+1,5% mostrando que teve uma redução pequena em relação ao PRFV que apresenta um valor de 6,90 mm/mm, como apresentado no gráfico da Figura 22.

Figura 22 - Deformação dos CPs de PRFV e PRFV+1,5%.

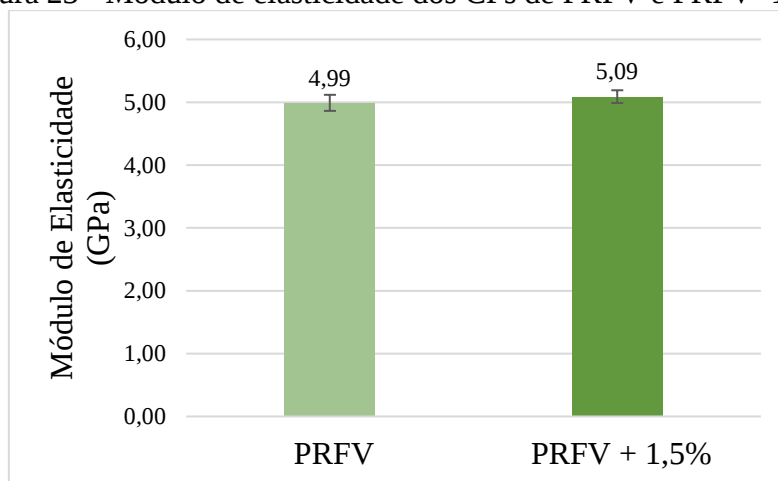


Fonte: Autor.

Percebe-se que não existe uma diferença relevante no módulo de elasticidade no PRFV+1,5% quando comprado com o PRFV, sendo respectivamente 4,99 GPa e 5,09

GPa como apresentado no gráfico da Figura 23, esse resultado pode ser considerado bom pois é o que se busca na fabricação de materiais compósitos.

Figura 23 - Módulo de elasticidade dos CPs de PRFV e PRFV+1,5%.



Fonte: Autor.

Os valores do desvio padrão do PRFV+1,5% para tensão máxima, deformação e do módulo de elasticidade foram aceitáveis, com valor baixo, respectivamente de 10,83 MPa 0,27 mm/mm e 0,10 GPa.

Freitas (2018) em seu trabalho realizou a comparação de um material feito de resina pura (poliéster) e outro com adição das cinzas *Eichhornia crassipes*, no qual percebeu que a adição de 2,5 % causava perdas significativas das propriedades, sendo uma redução em percentual aproximada de 24% para tensão de ruptura e 18% para o módulo de elasticidade.

Silva (2020) em seu trabalho realizou o estudo da influência da adição das cinzas da *Pistia stratiotes* em um compósito tendo como matriz a resina epóxi, no qual conseguiu verificar aumentos significativos na tensão de ruptura comparado ao material de resina pura, sendo de aproximadamente 30 % e 38 % para adições nas porcentagens de 1 % e 1,5 %, respectivamente. O autor também constatou que o módulo de elasticidade não apresentou alterações significativas, se mantendo bastante constantes.

Brito (2023) em seu trabalho estudou a influência da adição do pó de calcário em diversas granulometrias à um compósito de fibra de vidro com resina poliéster. O autor concluiu que a adição do pó de calcário com granulometria inferior a $53\mu\text{m}$ não alterou significativamente a tensão de ruptura e a deformação do material quando

comparado com a lâmina de fibra de vidro com resina poliéster, enquanto no módulo de elasticidade a adição do pó de calcário ocasionou um aumento de aproximadamente 9,33 % em relação a lâmina de fibra de vidro com resina poliéster.

6 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos nas análises de densidade deste trabalho, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- A densidade nos corpos de prova de PRFV, se encontra de acordo com a literatura.
- O aumento da porcentagem de cinzas da *Eichhornia crassipes* causou um leve aumento na média da densidade dos corpos de prova, sendo pouco significativo.
- O desvio padrão encontrado na análise da densidade de todos os corpos de prova apresentou um valor baixo, o que indica uma uniformidade entre os corpos de prova.

Por meio dos ensaios de tração uniaxial realizados nos corpos de provas, foi possível identificar e conhecer melhora nas propriedades mecânicas do material, como a tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade. Após as análises desses dados, concluiu-se que:

- Os corpos de prova de PRFV apresentaram uma média elevada da tensão máxima, que pode estar associada a quantidade de camadas e o processo de fabricação do material.
- Os valores do desvio padrão da tensão de ruptura, deformação e do módulo de elasticidade para os corpos de prova de PRFV foram satisfatórios.
- Os corpos de prova de PRFV+1% tiveram que ser descartados das comparações, por causa da ruptura fora do galgo definido. Falha que deve estar associada com a fabricação artesanal do material.
- Os corpos de prova de PRFV+1,5% apresentaram um pequeno aumento na tensão máxima e no módulo de elasticidade, em relação ao PRFV, onde apresentam respectivamente os valores de 359,04 MPa e 5,09 GPa para o PRFV+1,5% e 356,89 MPa e 4,99 GPa para o PRFV.
- Os valores do desvio padrão da tensão de ruptura, deformação, do módulo de elasticidade para os corpos de prova de PRFV+1,5% foram satisfatórios.

De forma geral os resultados obtidos com esse trabalho foram positivos e de acordo com o esperado, logo, pode se dizer que o uso das cinzas da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* na porcentagem de 1,5 % é viável como reforço na fabricação de um compósito de resina poliéster com fibra de vidro para os parâmetros analisados. Além de não alterar as propriedades mecânicas, será possível fechar o ciclo de recuperação ambiental com a utilização da biomassa produzida com um propósito que beneficia o meio ambiente, evitando que a poluição absorvida pela fitorremediação retorne às águas.

Por fim, fica como sugestão para futuros trabalhos refazer o material com a porcentagem de 1 %, para realizar novos ensaios e fazer análises válidas de acordo com as normas a serem utilizadas.

REFERÊNCIAS

- ABREU JÚNIOR, Lenir de. **Compósito polimérico híbrido constituído de fibras curtas de vidro e partículas de sílica**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São João Del – Rei, São João Del – Rei, 2015.
- ALVES, E. *et al.* Avaliações fisiológicas e bioquímicas de plantas de aguapé (*Eichhornia crassipes*) cultivadas com níveis excessivos de nutrientes. **Planta daninha**, v. 21, p. 27-35, 2003.
- 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 – 20b. **Standard Terminology for Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- BARROS, Alysson Régis de Freitas. **Compósitos híbridos: desenvolvimento de configuração e efeitos de umidificação**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BATISTA, Ana Claudia de Melo Caldas. **Envelhecimento ambiental em compósitos poliméricos à base de tecidos de reforços híbridos**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BRITO, Matheus T. de Oliveira *et al.* **Influence on mechanical properties with the addition of limestone powder in polyester/ fiberglass composite**. Journal of Composite Materials 2023, Vol. 0(0) 1–9
- CALLISTER, William D. Jr e RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- DIACENCO, Adriana Amaro. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibração e ruído**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 2010.
- FERREIRA, P.R., **Processos Especiais de Transformação Compósitos**, C.e.T. Instituto Federal de Educação, Editor. 2017.
- FONTES, Raphael Siqueira. **Compósito Polimérico Híbrido: Comportamento Mecânico, Descontinuidade Geométrica e Resistência Residual**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

FREIRE, Estevão; MONTEIRO, Elisabeth EC; CYRINO, Julio CR. **Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 3, p. 25-32, 2013.

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.

HEGEL, Carla Grasielle Zanin; MELO, Evanisa Fátima Reginato Quevedo. **Macrófitas aquáticas como bioindicadoras da qualidade da água dos arroios da RPPN Maragato**. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 9, n. 3, p. 673-693, 2016.

HENRY-SILVA, Gustavo Gonzaga; CAMARGO, Antonio Fernando Monteiro. **Valor nutritivo de macrófitas aquáticas flutuantes (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia molesta*) utilizadas no tratamento de efluentes de aquicultura**. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 24, p. 519-526, 2002.

HENRY-SILVA, Gustavo Gonzaga; CAMARGO, Antonio Fernando Monteiro. **Interações ecológicas entre as macrófitas aquáticas flutuantes *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes***. *Hoehnea*, v. 32, n. 3, p. 445-452, 2005.

LIMA, Moises Medeiros. **Viabilidade Da Utilização De Lâminas Poliméricas Híbridas Com Fibras Sintéticas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Mecânico) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2022.

LOPES, A., Paula, J. D., MARDEGAN, S. F., HAMADA, N., & PIEDADE, M. T. F. (2011). **Influência do hábitat na estrutura da comunidade de macroinvertebrados aquáticos associados às raízes de *Eichhornia crassipes* na região do Lago Catalão, Amazonas, Brasil**. *Acta Amazonica*, 41, 493-502.

MARIN, Felipe. **Análise de desgaste de ferramentas no processo de furação de compósito polimérico reforçado com fibras de vidro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Mecânico) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

MARTINS, André Trevizoli; PITELLI, R. A. **Efeitos do manejo de *Eichhornia crassipes* sobre a qualidade da água em condições de mesocosmos**. *Plantadaninha*, v. 23, p. 233-242, 2005.

MARTINS, D. F. F. **Estudo integrado do potencial fitorremediador da *Eichhornia crassipes* em ambientes naturais e sua utilização para obtenção de extratos proteicos**. 2014. 162 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

MARTINS, D. *et al.* (2002). **Controle químico de *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* e *Salvinia molesta* em caixas d'água**. *Planta Daninha*, 20, 83-88.

- MELO, Patricia Maria Alves de. **Compósitos particulados de polietileno de alta densidade e concha de molusco: Efeito do teor e da granulometria**. 2013.
- MOREIRA, Anabela Mendes. **Materiais compósitos**. Área de construção, 2009.
- NETO, Miguel Gomes Coelho; DE SOUZA, Luciane Lopes. **Estudo preliminar da composição, riqueza e similaridade de comunidades de macrófitas aquáticas (Tonantins, Amazonas)**. *Holos Environment*, v. 22, n. 1, p. 65-77, 2022.
- OLIVEIRA, Jorge Fernando de Sousa. **Plásticos reforçados a base de tecidos híbridos: efeitos da anisotropia e geometria normativa na caracterização mecânica e da fratura**. 2013.
- OTA, Waldyr Naoki. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. Dissertação - Curso de Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (Pipe), Universidade Federal do Paraná, 2004.
- ORTH, Cíntia Madureira; BALDIN, Nelma; ZANOTELLI, Cladir Teresinha. Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra de vidro sobre o meio ambiente e a saúde do trabalhador: o caso da indústria automobilística. **Revista Produção Online**, v. 12, n. 2, p. 537-556, 2012.
- PALMA-SILVA, C., ALBERTONI, E. F., TRINDADE, C. R. T., FURLANETTO, L. M., & ACOSTA, M. D. C. (2012). **Uso de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms para fitorremediação de ambientes eutrofizados subtropicais no sul do Brasil**. *PERSPECTIVA*, Erechim. v.36, n.133, p.73-81,
- PEREIRA, Warley Augusto *et al.* **Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 26, 2021.
- PIRES, Fábio Ribeiro *et al.* **Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas**. *Planta daninha*, v. 21, p. 335-341, 2003.
- POLETTTO, Matheus. **Compósitos termoplásticos com madeira-uma breve revisão**. *Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada*, v. 2, n. 4, p. 42-48, 2017.
- RODRIGUES, Ana Carolina D. *et al.* **Mecanismos de respostas das plantas à poluição por metais pesados: Possibilidade de uso de macrófitas para remediação de ambientes aquáticos contaminados**. *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 1, p. 262-276, 2016.
- SILVA, Amanda Albertin Xavier da. **Comportamento mecânico e balístico de laminados híbridos de aramida/vidro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2022.
- SILVA, Bruno Henrique Alves da. **Comportamento compressivo de compósito polimérico a base de tecido híbrido kevlar vidro**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Engenheiro Mecânico). 2019.

SILVA, Fábio César da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.

SILVA, Henrique Pereira da. **Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na especialidade de Construção Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2014.

SILVA, Nilson Francisco da. **Avaliação do efeito da umidade em compósitos poliméricos reforçados com cinzas de macrófitas aquáticas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Mecânico) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2020.

SILVA, Rosana Vilarim da *et al.* **Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 13, p. 154-161, 2008.

SPÓSITO, Thadeu Henrique Novais. **Matéria seca e acúmulo de nutrientes no aguapé utilizado para fitorremediação em águas residuárias de suinocultura**. Tese de Doutorado em Agronomia (Sistemas de Produção). Universidade Estadual Paulista. 2018.

VASCONCELLOS, Maria Cristina; PAGLIUSO, Débora; SOTOMAIOR, Vanessa Santos. Fitorremediação: **Uma proposta de descontaminação do solo**. *Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade*, v. 83, p. 261-267, 2012.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. 2009.

VIEIRA, Priscilla Rocha; VIEIRA, Janine Domingos; CARVALHO, Eliane Maria Lopes. **Análise das propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro**. *Engevista*, v. 18, n. 2, p. 363-374, 2016.