



ESTUDO DA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PRFV COM A ADIÇÃO DE CINZAS DE *PISTIA STRATIOTES*

HERMANO DA NÓBREGA CLEMENTINO; ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS
BATISTA; DANIEL FREITAS FREIRE MARTINS

RESUMO

Na busca por materiais mais leves e eficientes, os compósitos são uma alternativa para obter propriedades mecânicas superiores com peso reduzido, ou seja, propriedades específicas superiores. A utilização de reforços híbridos com fibras e/ou partículas em matrizes poliméricas tem obtido resultados positivos. Este trabalho apresentou a temática da viabilização do uso das cinzas da *Pistia stratiotes* em Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV), avaliando seus efeitos nas propriedades mecânicas do material. A *Pistia stratiotes* possui potencial fitorremediador, sendo útil na recuperação de ambientes aquáticos poluídos, especialmente por metais pesados. No entanto, em locais onde essa planta é invasora, sua proliferação rápida pode formar densos tapetes sobre a água, prejudicando a biodiversidade local. O objetivo desta pesquisa foi utilizar as cinzas dessa macrófita aquática para reduzir os danos ambientais e analisar sua influência nas propriedades dos PRFV. A metodologia incluiu ensaios de tração uniaxial e densidade volumétrica. Os resultados mostraram que a utilização das cinzas da *Pistia stratiotes* não proporcionou melhoras significativas nas propriedades mecânicas do material, porém ocasionou uma influência positiva no início da carga de dano dos corpos de prova e não afetou negativamente suas características originais. 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 e fixando os poluentes no PRFV.

Palavras-chave: Hibridização; Fitorremediação; Ambientes Aquáticos; Rejeito; Macrófitas.

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. 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 ralos 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 pode remover poluentes do ambiente, já que, ao final de seu ciclo de vida, elas devem ser retiradas e depositadas em locais adequados. Caso contrário, elas irão morrer e se decompor, liberando novamente os contaminantes absorvidos para o ambiente. Desse modo, para encerrar o ciclo de poluição, uma possibilidade seria a utilização dessas plantas em materiais compósitos.

Os compósitos combinam uma fase matriz e uma fase reforço, que pode ser fibra e/ou partícula. As cinzas da *Pistia stratiotes* podem atuar como reforço particulado em Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV), fixando os poluentes e impedindo seu retorno ao ambiente natural. Os PRFV são amplamente utilizados e 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 considerar a utilização das cinzas da *Pistia stratiotes* no final de seu ciclo de vida como reforço particulado em compósitos, contribuindo para a limpeza de ambientes aquáticos poluídos. Logo, o objetivo do trabalho consiste em 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 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados na matriz

Foi utilizado a cinzas de *Pistia stratiotes* como reforço particulado, O tecido de fibra de vidro-E bidirecional tipo tela 1x1, com orientação 0° a 90° como reforço fibroso e a resina termofixa poliéster ortoftálica, acelerada por um catalisador.

2.2 Métodos

Neste trabalho as cinzas já foram previamente adquiridas por Freitas (2018), que segundo ela, a planta foi coletada aleatoriamente nas margens do rio Apodi/Mossoró e armazenada em baldes e sacos plásticos. Em seguida, as amostras passaram por limpeza para remoção de sujeiras presentes na planta. Após o tratamento das plantas, foi retirada a umidade das amostras através da secagem, 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).

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, utilizou-se uma balança de precisão Shimadzu® TX323L para pesagem da resina, cinzas e catalisador. O laminado de PRFV foi confeccionado com resina poliéster e 0,8% de catalisador. As cinzas de *Pistia stratiotes* foram adicionadas à mistura resina

poliéster e catalisador em 0,5% e 1%, com 1,5% e 3% de catalisador, respectivamente, com base nos critérios de endurecimento da matriz. Esses compósitos foram comparados com a fibra de vidro sem a adição de cinzas na sua composição. Posteriormente, realizou-se 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*.

Em seguida foi utilizado um molde para dar forma ao compósito, no qual foram utilizadas duas placas de vidros no processo, consistindo na matriz compósito com a adição de dez camadas de tecido de fibra de vidro entre os dois moldes, sendo usado um rolo metálico na distribuição da resina sobre o tecido.

O tempo de cura da matriz polimérica foi de 24 horas, tempo necessário até a resina atingir o estado termofixo e estar pronta para ser retirada do molde. A placa formada teve sua espessura medida com um micrômetro digital. Após a formação da matriz, utilizou-se uma largura de 25 mm $\pm$ 0,25 mm conforme a norma ASTM D3039 (2017). Embora a norma recomende 250 mm de comprimento, foi necessário utilizar 240 mm devido à limitação da garra, com um galgo de 127 mm. Foram marcados dez corpos de prova para cada material: PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%, conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 - Descrição normativa dos corpos de prova 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>

Após os materiais devidamente identificados, é preparado para o ensaio de tração uniaxial. Na realização do ensaio de tração, foi utilizada a máquina EMIC® DL 10000 de capacidade máxima de 100 kN, 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. A velocidade de 2 mm/min foi utilizada no ensaio, de acordo com a norma ASTM D3039 (2017). Durante o ensaio de tração os corpos de prova selecionados foram os que obtiveram fraturas na região demarcada entre os galgos, qualquer fratura que ao final do teste ultrapasse a demarcação seria descartada. Destaca-se que se obteve cinco amostras válidas para cada condição como orienta a norma ASTM D3039 (2017).

Para obter as propriedades mecânicas desejadas, foram utilizadas as equações de tensão (σ), deformação (ϵ) e módulo de elasticidade (GPa). Com os valores de tensão (MPa), deformação (%) e o módulo de elasticidade do material (GPa), armazenados no Excel®, os gráficos foram plotados no Origin® podendo assim obter o gráfico Tensão x Deformação dos corpos de prova e observar os resultados com cada proporção testada.

Para o ensaio de densidade volumétrica foi preparado cinco corpos de prova para cada proporção utilizada (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1% de cinzas) de dimensão 25x25 mm aproximadamente. 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, como orientado na norma ASTM D792 (2008).

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, nesse processo toda a umidade dos corpos de prova foi retirada. Após o tempo de secagem, os corpos de prova foram resfriados em um dessecador para evitar absorção de umidade do ambiente externo. Após 1 hora de resfriamento, foram pesados na balança de precisão Shimadzu® AUY220. Para a medição da densidade volumétrica, são necessárias as massas secas e submersas em água

destilada dos corpos de prova. Para obter a massa submersa, utilizou-se um afundador de cobre. Tendo realizado as medições de todas as medidas, foram registrados os resultados 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 corpos de provas (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1%).

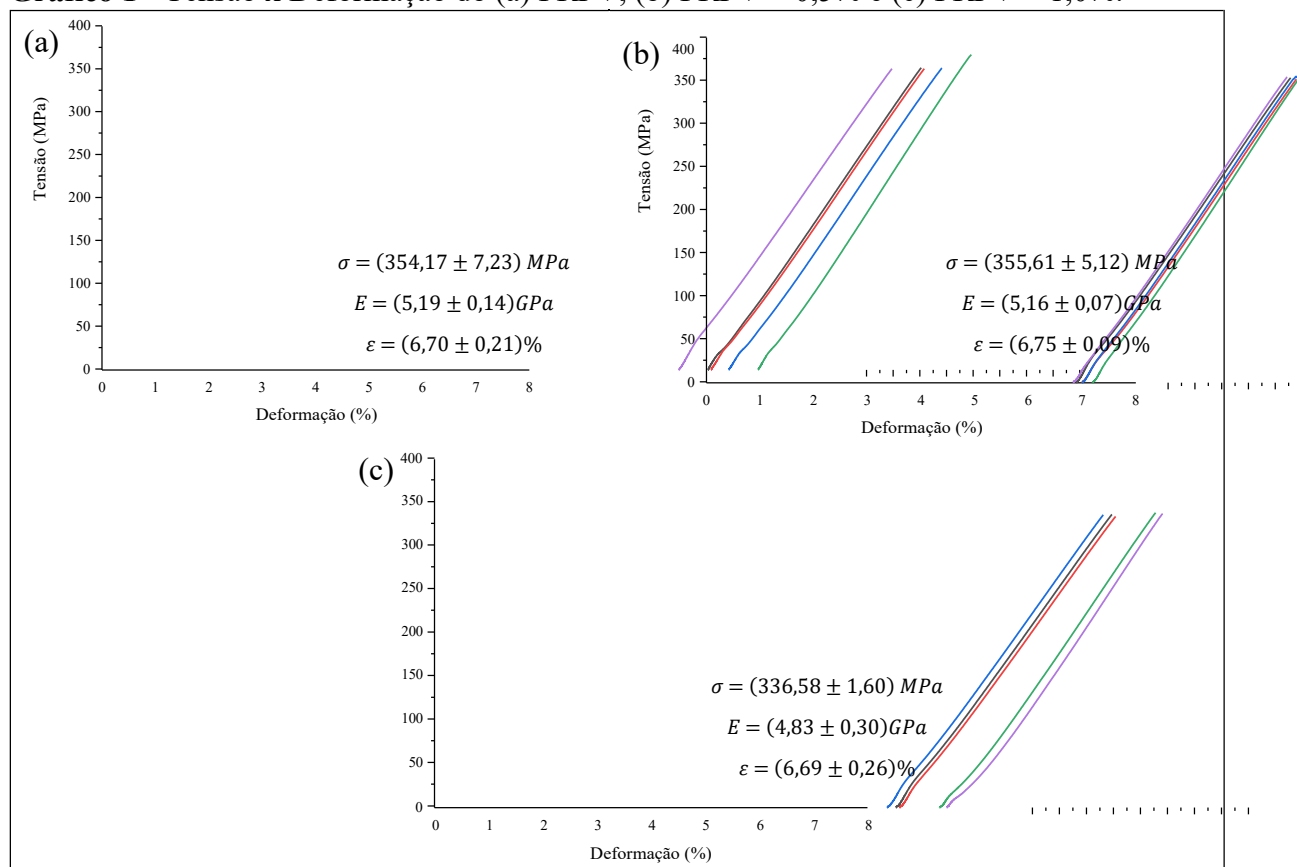
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 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 corpos de prova, carga essa, no qual o material começa a trincar devido aos esforços mecânicos da máquina no material.

Com os gráficos gerados foi possível obter: Resistência à ruptura (MPa), Módulo de elasticidade (GPa) e deformação (%), mostrados no Gráfico 1. 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 das cinzas gerou ao PRFV.

Gráfico 1 - Tensão x Deformação do (a) PRFV, (b) PRFV + 0,5% e (c) PRFV + 1,0%.



Para o PRFV o início de carga de dano foi de 13kN 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 5 corpos de prova que obtiveram fraturas válidas. O Gráfico 1 (a) representa o comportamento do gráfico para esse tipo de material.

O início da carga de dano no PRFV + 0,5% foi de 16,5 kN o equivalente a aproximadamente 284,59 MPa, um valor melhor que o compósito sem a adição de Pistia

stratiotes que obteve 13 kN. Na realização do gráfico Tensão x Deformação do PRFV + 0,5%, foi escolhido 5 corpos de prova que obtiveram fraturas válidas. O Gráfico 1 (b) representa o comportamento do gráfico para esse tipo de material.

A curva mostrada no Gráfico 1 (b), apresentou um comportamento satisfatório durante o ensaio de tração uniaxial, no qual os valores foram bem similares ao PRFV, o que indica que a adição não acarretou em uma variação nas propriedades mecânicas do material.

No PRFV + 1,0% o início de carga de dano obtido foi de 20 kN o equivalente a aproximadamente 344,53 MPa, um valor melhor que o PRFV. Na realização do gráfico Tensão x Deformação do PRFV + 1,0%, foi escolhido 5 corpos de prova que obtiveram fraturas válidas. O Gráfico 1 (c) representa o comportamento do gráfico para esse tipo de material.

Os testes com PRFV + 1,0% foram bem satisfatórias, analisando o Gráfico 1 pôde-se observar que o material manteve suas propriedades mecânicas semelhantes ao PRFV e PRFV +0,5%.

3.2 Comparativo da Influência na Adição das cinzas de *Pistia stratiotes*

Nesta seção será analisado o resultado dos testes, discutido os valores obtidos de tensão máxima (MPa), deformação normal (%), módulo de elasticidade (GPa) e o 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 de cinzas de *Pistia stratiotes* gerou nas propriedades mecânicas dos materiais.

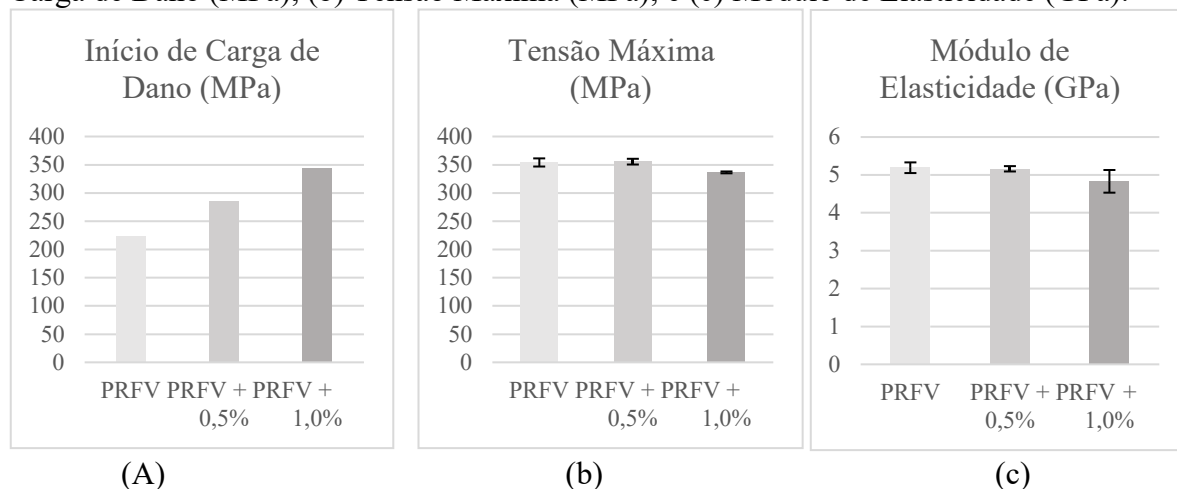
De acordo com os dados do Gráfico 2 (a), é possível visualizar que a utilização das cinzas de *Pistia stratiotes* auxiliou no aumento do início de carga de dano do material. Destaca-se que não se deve realizar um dimensionamento com valores acima da carga de início de dano, sendo está a tensão de projeto. 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 na adição das cinzas.

No Gráfico 2 (b), observa-se que a resistência à tração não sofreu uma influência significativa pela adição das cinzas de *Pistia stratiotes*. Em um estudo anterior, França *et al.* (2020), utilizou o processo *Hand Lay-Up* para estudar o PRFV reforçado com 10% de granito em partículas. A autora obteve que a granulometria do granito não influenciou na resistência máxima do material, obtendo o valor de 71,50 MPa para o PRFV com essa adição. Porém, a maior espessura causada pela adição das cinzas resultou em uma menor resistência à tração em comparação com o PRFV sem adição de granito.

No quesito do módulo de elasticidade dos materiais houve 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, como pode ser visto no Gráfico 2 (c).

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 cinzas não alterou o módulo de elasticidade, mantendo o valor de 0,92 GPa com desvio padrão de 0,02.

Gráfico 2 - Comparativo entre PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%, para (a) Início de Carga de Dano (MPa); (b) Tensão Máxima (MPa); e (c) Módulo de Elasticidade (GPa).



3.3 Densidade Volumétrica dos CP's

Para o ensaio de densidade volumétrica a Tabela 1 mostra os materiais laminados, o valor médio e o desvio padrão para os três compósitos (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%). Para o PRFV, obteve-se o valor médio de $1,66 \text{ g/cm}^3$, 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 $1,52 \text{ g/cm}^3$. A densidade volumétrica do PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0% obtiveram valores semelhantes ao PRFV, seu valor médio é de $1,63 \text{ g/cm}^3$ e $1,65 \text{ g/cm}^3$, mantendo o desvio padrão $0,01 \text{ g/cm}^3$. Destacando-se que os valores encontrados são próximos.

Tabela 1 - Dados da densidade volumétrica dos CP's.

Material Laminado	Valor Médio	Desvio Padrão
PRFV	1,66	0,01
PRFV + 0,5%	1,63	0,01
PRFV + 1%	1,65	0,01

4 CONCLUSÃO

Após as análises realizadas nos PRFV com adição de *Pistia stratiotes*, dos ensaios de densidade e tração uniaxial, concluiu-se que os três compósitos propostos (PRFV, PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0%) apresentaram propriedades semelhantes, mesmo com a adição das cinzas. O início de carga de dano nos PRFV + 0,5% e PRFV + 1,0% mostrou valores positivos durante o ensaio de tração, indicando uma influência benéfica no início de carga de dano à medida que fosse adicionado as cinzas de *Pistia stratiotes*. Conclui-se que a adição de cinzas de *Pistia stratiotes* em PRFV se mostra viável, pois as propriedades mecânicas como resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação apresentaram valores similares, ainda sim são resultados satisfatórios. Isso oferece uma alternativa para manejar as plantas no final de seu ciclo de vida, evitando que os poluentes absorvidos sejam reintroduzidos no ambiente durante a sua decomposição. Além disso, a carga de início de dano foi melhorada, o que é uma vantagem em cenários que exigem propriedades robustas nesse aspecto.

REFERÊNCIAS

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.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais um Introdução.** 10.ed. Rio de janeiro: LTC, Rio de janeiro, 2021.

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>.

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.

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.

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.

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.

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.

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>.