**Ensaios com biopolímero superabsorvente (Bio-SAP) como agente hidrorretentor para aplicações em bioengenharia do solo**

**Tests with superabsorbent biopolymer (Bio-SAP) as a water-retaining agent for applications in soil bioengineering**

**Resumo**

Geocompostos, quando utilizados como biotêxteis para o controle de erosão, têm a capacidade de melhorar a drenagem e favorecer o desenvolvimento vegetal, contribuindo assim para a revegetação e estabilização do solo. Neste estudo, investigamos o desempenho de um núcleo orgânico composto por biopolímero superabsorvente (Bio-SAP), formulado com fibras de *Typha domingensis*, desenvolvido para compor geocompostos com potencial aplicação em soluções de bioengenharia do solo, utilizando geogrelhas naturais de rami (*Boehmeria nivea*).

**Palavras-chave:** *Typha domingensis*; conservação do solo; bioengenharia dos solos; *Eruca sativa.*

**Introdução**

Neste contexto, o objetivo deste trabalho avaliar o desempenho de núcleos hidrorretentores em geocompostos confeccionados a partir fibras naturais de Taboa (*Typha domingensis*), como componente estrutural em geotêxteis do tipo geocomposto hidrorretentor.

**Material e métodos**

O experimento será conduzido em uma casa de vegetação no Departamento de Engenharia Agronômica da Universidade Federal de Sergipe. As sementes de rúcula utilizadas serão obtidas comercialmente, classificadas como rúcula folha larga.

* + 1. **Geocompostos**

Outra tecnologia a ser desenvolvida e instalada serão os geocompostos. A essência dos geocompostos drenantes reside na integração das propriedades ótimas de distintos materiais, de forma que seus objetivos sejam plenamente satisfeitos. Comumente, os geocompostos são formados por elementos sintéticos, podendo ser elaborados por meio de processos industriais ou, alternativamente, construídos in situ no canteiro de obras. Em determinadas situações, a fusão com materiais não-sintéticos pode ser estratégica, visando potencializar o desempenho e/ou otimizar os custos associados. Importante ressaltar que, diferentemente das fibras sintéticas tradicionais, o geocomposto proposto neste estudo é integralmente composto por fibras naturais (Figura 1), destacando-se no contexto de sustentabilidade e inovação no setor.

Figura 1. Geocomposto confeccionado a partir de fibras naturais de (*Rami boehmeria*) nivea) e Taboa (*Typha domingensis*).



Fonte: Próprio autor (2025)

Os geocompostos são comumente caracterizados pela utilização de geotêxteis posicionados acima ou abaixo de uma geogrid (Figura 2a), ou uma geogrid envolvida por dois geotêxteis, satisfazendo, desta forma, funções de filtração e drenagem. Devido ao fato de que o geocomposto é um material em formato laminar e semirrígido (Figura 2b), o geocomposto pode ser facilmente acomodado em formato de rolo, permitindo o transporte de grande quantidade, assim como facilitar sua aplicação, mesmo quando submetido a deslocamentos ou deformações. A essência dos geocompostos drenantes reside na integração das propriedades ótimas de distintos materiais, de forma que seus objetivos sejam plenamente satisfeitos. Comumente, os geocompostos são formados por elementos sintéticos, podendo ser elaborados por meio de processos industriais ou, alternativamente, construídos in situ no canteiro de obras.

Figura 2. a) visão esquemática do geocomposto constituído de duas camadas externas de geotêxtil a partir de fibra de Taboa e por um núcleo em *geogrid* de fibra de Rami, b) visão esquemática em perspectiva do geocomposto em formato laminado.

|  |  |
| --- | --- |
| Forma  Descrição gerada automaticamente com confiança baixa | Forma  Descrição gerada automaticamente com confiança baixa |

Fonte: Acervo próprio autor (2024)

*Tratamento das fibras*

O tratamento das fibras de rami que comporão o geocomposto será conduzido preferencialmente em quatro etapas principais: (1) corte das fibras; (2) decorticações e degomagem das fibras; (3) secagem e (4) enfeixamento.

A extração do material vegetal é realizada com precisão, utilizando instrumentos de lâmina lisa para evitar danos às fibras. A qualidade das fibras naturais depende, em grande parte, do manejo cuidadoso deste material biológico. Os cortes são executados acima da raiz, permitindo o rebrote cortando bastões maduros e protegendo as raízes.

As comunidades produtoras estabelecem um intervalo de seis meses a um ano entre os cortes para as fibras de Taboa e aproximadamente 70 dias para o corte das fibras de Ramie. A partir do corte o córtex é removido mecanicamente ou manualmente em um processo, as chamadas decorticações (Figura 3). Para as fibras de Ramie são os córtex são raspados para remover a casca e as gengivas parciais e conduzidos para a degomagem (Cheng et al., 2020).

Figura 3. Processamento das fibras de Ramie.

Imagem em branco e preto

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Fonte: Adaptado de (Cheng et al., 2020).

Especificamente, as fitas decorticadas do rami serão submetidas a um tratamento térmico sob alta pressão a 160°C, durante 1 h, utilizando-se uma proporção de líquido (denominado liquor) de 6:1. A solução empregada para o cozimento será composta por 1% de NaOH, 3% de Na2SO3 e 3% de Na5P3O10. Posteriormente, o liquor resultante do procedimento será eliminado e as fibras submetidas a uma lavagem com água, conforme procedimentos adotados por Bhattacharya e Das (2001).

A subsequente etapa envolverá o branqueamento das fibras de Ramie. Este processo ocorrerá durante 1 h, utilizando uma solução contendo 1% de H2O2 a 83°C, com pH ajustado para 9,0. Após a conclusão deste procedimento, as fibras serão lavadas utilizando ácido acético diluído e água. Posteriormente, serão incorporadas emulsões de óleo à base de hidrocarbonetos sulfonados, variando de 3% a 4% com base no peso seco das fibras, que serão centrifugadas, retendo-se o excesso de emulsão para reutilização em lotes subsequentes, e por fim, serão submetidas ao processo de secagem. Prevê-se que a finura, tenacidade e extensão na ruptura das fibras de Rami após refinamento, e com potencial aplicabilidade em geotêxteis, serão de 0,77 Tex, 828,3 mN/Tex e 0,6 mm, respectivamente.

Entre o período de secagem e o início da confecção, as fibras de ambas as espécies são habilmente enfeixadas utilizando cordas e armazenadas em feixes com peso médio de 3 kg cada, em um ambiente arejado e seco.

**Confecção dos núcleos hidrorretentores**

Para a confecção do núcleo hidrorretentor, serão utilizadas fibras de taboa (*Typha dominguensis*). As folhas de taboa serão colhidas removendo-se a parte superior da planta, deixando o rizoma no solo, a fim de preservar sua regeneração natural (Figura 4a). Para a confecção do núcleo, as folhas de taboa serão separadas em duas partes: o limbo e a bainha (Figura 4b a e 4c). Da bainha das folhas, serão extraídas as fibras naturais utilizadas nos testes, enquanto o limbo foi moído e deixado para secagem em temperatura ambiente (Figura 4d).

Figura 4. (a) corte de *Typha dominguenses,* (b) limbo foliar, (c) bainha foliar e (d) resíduos triturados oriundos das demais partes da planta

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Vaso de planta  Descrição gerada automaticamente com confiança média |  |

Fonte: Acervo próprio autor (2024)

O processo de extração das fibras será realizado com o auxílio de um guilhotina faca (Figura 5a). A partir do desfibramento, as fibras extraídas da bainha serão lavadas com água e secas ao ar (Figura 5b).

Figura 5. a) fibras de taboa em processo de secagem c) processo de desfibramento e d) Limbo foliar da taboa em secagem ao ar

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Fonte: Acervo próprio autor (2025)

O limbo foliar, caracterizado aqui como resíduo após o processo de secagem será conduzido ao processo de secagem e moagem (Figura 6).

Figura 6. Material vegetal separado (a) e (b) resíduo vegetal após moagem para confecção do núcleo hidrorretentor vegetal

|  |  |
| --- | --- |
| Uma imagem contendo deitado, pilha, mesa, sujo  Descrição gerada automaticamente | Uma imagem contendo pessoa, grama, jovem, mulher  Descrição gerada automaticamente |

Fonte: Acervo próprio autor (2024)

Devido à natureza variável dos materiais, a espessura dos caules de taboa pode apresentar variações após o processo de secagem, influenciada por fatores como clima, disponibilidade de água durante o crescimento, época de plantio e nível de alagamento. No entanto, é relevante destacar que as fibras segmentadas do geotêxtil de taboa são caracterizadas por uma espessura que oscila entre 0,04 mm e 0,06 mm. Quanto ao comprimento das fibras segmentadas de taboa, este também pode variar, mas, em essência, é produzido com comprimentos na faixa de 0,60 m a 1 m.

Para melhorar o desempenho e a durabilidade dos núcleos, especialmente em condições de exposição às variáveis climáticas, assim como mantê-lo rígido a fim de conduzir a campo, será utilizado um tratamento químico à base de resina vegetal derivada de mamona, solvente natural à base de D-limoneno e espessante natural (Figura 7).

Figura 7. (a) Resina impermeabilizante a base de poliol e (b) solvente 93% limoneno

|  |  |
| --- | --- |
| Garrafa e copo de liquidificador  Descrição gerada automaticamente com confiança média | Garrafa de vidro  Descrição gerada automaticamente |

A resina bicomponente empregada será formulada na proporção de 2:1, sendo dois volumes de pré-polímero (isocianato derivado de óleo de mamona) e um volume de poliol. Essa proporção assegura a formação de uma matriz polimérica resistente e flexível, promovendo uma maior impermeabilidade e coesão estrutural às fibras naturais.

Após o processo de homogeneização de todas as partes, o material será transferido para a caixa de prensagem metálica e distribuído de forma uniforme dentro de um molde de dimensões pré-determinadas. Além disso, as fibras e demais materiais serão prensados a 1 tonelada durante 24 horas, utilizando uma prensa hidráulica (Figura 8a) e uma caixa compactadora (Figura 8b), assegurando a compactação adequada dos materiais para a formação do geocomposto.

Figura 8. a) prensa hidráulica, b) caixa de prensagem e c) tampa de corte.

|  |  |
| --- | --- |
| Forma  Descrição gerada automaticamente com confiança baixa Uma imagem contendo cadeira, mesa, pequeno, quarto  Descrição gerada automaticamente | Uma imagem contendo Ícone  Descrição gerada automaticamente |
| Uma imagem contendo comida, recipiente, caixa, bandeja  Descrição gerada automaticamente | Imagem em preto e branco  Descrição gerada automaticamente |

Fonte: Acervo próprio autor (2024)

Os núcleos drenantes possuem espessura de 50 mm, o que está em conformidade com as espessuras padronizadas para mantas geotécnicas como lã de vidro e lã de rocha, com densidade de 0,0625 g/cm³. Utilizou-se uma forma adaptada para realizar o processo de centrifugação, a fim de misturar os componentes, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9. Núcleo drenante após prensagem

Mapa

Descrição gerada automaticamente

As frações que compõem os núcleos para ensaios consistiram em quatro formulações sendo identificadas como N1 (formulação completa), N2 (sem resina), N3 (resíduos vegetais) e N4 (resíduos e fibras).

A amostra N1 foi formulada sendo composta de duas partes vegetais (limbo e bainha foliar), nesse caso, a composição seguiu a seguinte proporção: 24% de limbo das folhas de Taboa, 20% de fibras derivadas da bainha das folhas de Taboa, 20% de resina, 6% de solvente e 30% de espessante.

A amostra N2 foi formulada tendo as partes vegetais na mesma proporção que a N1, porém não contou com a presença do solvente D’limoneno, sendo a seguinte proporção: 24% de limbo das folhas de Taboa, 20% de fibras derivadas da bainha das folhas de Taboa, 26% de resina e 30% de espessante.

Para a amostra N3 foi formulada tendo as partes vegetais composta apenas com limbo foliar, sendo a seguinte proporção: 44% de limbo das folhas de Taboa, 20% de resina, 6% de solvente e 30% de espessante.

E por fim a amostra N4 foi formulada tendo as partes vegetais composta igual, mas sem a presença da resina, sendo esta substituída por água destilada. Neste sentido a N4 contou com a seguinte formulação: 44% de limbo das folhas de Taboa, 20% de água destilada, 6% de solvente e 30% de espessante.

A homogeneização de todas as formulações foi realizada utilizando uma encoladeira por cinco minutos, ou até atingir um teor de uniformidade na distribuição das frações líquidas.

**Confecção das Geogrelhas**

As fibras de Rami *(boehmeria* nivea) foram trançadas com precisão para criar um fio que ofereça maleabilidade, uniformidade e resistência ideais, resultando em fios com diâmetro médio de cerca de 6 mm. Durante a confecção, as fibras de Rami foram dispostas em um molde de madeira medindo 1,20 m x 1,20 m, onde pinos fixos, com espaçamento de 5 cm e comprimento de 0,05 m, auxiliam no processo de trançado. As fibras iniciais são posicionadas ao redor do molde e presas, servindo como base para as linhas sobrepostas. Em cada segmento inicial, uma fibra é trançada até seu lado paralelo, seguida por fibras em forma cruzada, resultando na formação de quadrículas (Figura 10).

Figura 10. Tear artesanal para confecção de geogrids

Tela de computador com texto preto sobre fundo branco

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Os geotêxteis do tipo em geocomposto serão confeccionados seguindo a disposição do tipo triaxial em duas camadas sobrepostas a um núcleo drenante (Figura 10) formando assim um agregado em três camadas. Em ângulo cruzado de fibras, é aplicado um nó, tornando assim a quadricula delimitada e mais resistente à tração aplicada no geotêxtil. Ao final da confecção, são realizados ajustes e uniformização dos tamanhos do geotêxtil e dos nós aplicados. Ao final obtém-se uma parte esquelética em forma de matriz quadriculada com alta resistência à tração, projetado para o controle da erosão.

**Teste de saturação prolongada**

Para análise de saturação prolongada, o material será submetido a um regime de saturação e secagem em seis tempos distintos considerando um tempo a cada 48h de exposição. Esta análise nos permite avaliar a influência da duração de saturação sobre a capacidade de absorção de água do núcleo drenante.

Esse parâmetro foi determinado com base em uma adaptação do protocolo descrito por Amziane et al. (2017). Inicialmente, as fibras serão secas a 40 °C, assegurando uma remoção adequada de umidade por 2h em estufa de secagem forçada. Em seguida, as amostras de núcleos medindo 900 mm de diâmetro e 10 mm de espessura (Figura 11), foram imersas em água destilada por um período de 48 horas para promover a saturação completa.

Figura 11. Amostras de núcleos hidrorretentores

Bandeja com potes de comida

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Após o período de imersão, a remoção da água superficial foi realizada por prensagem, garantindo a consistência no procedimento de eliminação de excesso de líquido. Posteriormente, as fibras foram pesadas e medidas, tendo sua massa obtida pós-imersão, para a avaliação da capacidade de absorção de água foi utilizada no cálculo do coeficiente de absorção de água (Equação 1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Onde:

*m(t)* é a massa das fibras após o tempo (*t*) de imersão,

*m0* é a massa inicial das fibras (em condição seca),

e *m∞​* é a massa do material após atingir o equilíbrio, ou seja, quando a absorção de água se estabiliza, neste caso quando não mais apresenta escoamento de água.

Além disso, para analisar a capacidade de expansão dimensional do núcleo, considerando o diâmetro seco (​) e o diâmetro úmido (​), utilizou-se a fórmula de dilatação percentual (Equação 2) presente na norma ASTM D5199-12(2019):

Neste caso, considerando que cada corpo de prova (núcleo) é uma seção circular, este foi dividido em três seções igualmente espaçadas, em cada uma das quais foi medido o diâmetro com ajuda de um paquímetro. A dilatação percentual foi calculada com base na média das três medidas obtidas, garantindo maior representatividade e confiabilidade nos resultados.

Além da análise de expansão dimensional, também foi avaliada a variação dimensional total, que considera também os valores de espessura, sendo ela seca (​) e úmida (​), conforme descrito na normas ASTM D1777-96(2019), ASTM D5199-12(2019) e ISO 9863-1 para medições sob condições controladas. A variação dimensional total, englobando tanto diâmetro quanto espessura, foi calculada por meio da seguinte fórmula (Equação 3):

**Análise estatística**

O experimento será conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por três tratamentos (dois com núcleos hidrorretentores e um controle), com 10 repetições. Para as mudas cultivadas com o núcleo drenante, utilizou-se um substrato formado por fibras naturais de Taboa e areia lavada mais terra vegetal na proporção 1:1. Cada tratamento será disposto em bandejas com 10 células, e a semeadura será realizada com a colocação de duas sementes por célula.

A verificação da normalidade dos dados será realizada utilizando os testes de Kolmogorov-Smirnov (Berger e Zhou, 2014) e Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965). A homogeneidade das variâncias será avaliada por meio do teste de Levene (Schultz, 1985). Em casos de ausência de normalidade ou homogeneidade das variâncias, aplicaram-se procedimentos de bootstrapping (1000 reamostragens; IC de 95% BCa), proporcionando maior robustez aos resultados e ajustando possíveis desvios da normalidade, conforme recomendado por Haukoos e Lewis (2005). Para as comparações entre médias, será empregado o teste post hoc de Bonferroni, com nível de significância de 5%.

No segundo bioensaio, os dados referentes ao Índice de Germinação das Sementes (IGS), Comprimento da Raiz na placa (CRZ), Longitude da Raiz na placa (LRZ), Altura na Bandeja (AB), Número de Folhas na Bandeja (NFB), Massa Seca da Parte Aérea na Bandeja (MSPAB), Comprimento Radicular na Bandeja (CRB), Massa Seca Radicular na Bandeja (MSRB), Volume Radicular na Bandeja (VRB), Diâmetro Radicular na Bandeja (DRB), Densidade Radicular na Bandeja (DRB), e Dependência de Substrato na Bandeja (DSB) serão analisados estatisticamente. Da mesma forma, os dados de Altura (A), Número de Folhas (NF), Massa Fresca da Parte Aérea (MSPA), Massa Seca da Parte Aérea (MSPA), Comprimento Radicular (CR), Massa Seca Radicular (MSR), Volume Radicular (VR), Diâmetro Radicular (DR), Densidade Radicular (DR) e Dependência de Substrato (DS) serão submetidos à análise de variância (ANOVA).

Quando as análises indicaram diferenças significativas, será aplicado o teste post hoc de Bonferroni para comparar os grupos com significância estatística estabelecida em p < 0,05. As análises serão conduzidas utilizando o software IBM® SPSS® (SPSS Corp, 2017), com a finalidade de garantir a precisão estatística e a robustez dos resultados.

Além das análises de variância, será realizada uma análise de regressão linear múltipla (método *forward*) para investigar a relação entre as variáveis do núcleo e o desenvolvimento das mudas. As variáveis dependentes consideradas serão massa seca da parte aérea (MSPA), comprimento radicular (CR) e massa seca radicular (MSR), enquanto as variáveis independentes incluíram as proporções de resina, fibras e folhas nos substratos.

**Resultados e Discussão**

**Teste de saturação prolongada**

O impacto do tempo sobre o coeficiente de absorção de água foi avaliado para três tipos de núcleos hidrorretentores: N1 (formulação completa), N2 (sem resina), N3 (resíduos vegetais).

Para o núcleo N1, o modelo de regressão apresentou um coeficiente de determinação (R²) de apenas 0,002, indicando que a variância explicada pelo tempo não é significativa. A análise de variância (ANOVA) mostrou que o modelo não foi estatisticamente significativo (F(1,118) = 0,224; p = 0,637), indicando que o tempo não possui uma influência relevante sobre o coeficiente de absorção de água do núcleo N1. Este resultado pode ser atribuído à rápida capacidade de estabilização e à máxima eficiência de absorção do núcleo (Betene et al., 2020).

A saturação inicial frequentemente é regulada pelas propriedades capilares e pela afinidade química do material com a água. Em fibras vegetais empregadas em geotêxteis, como no núcleo analisado, essas características podem estar predominantemente influenciadas pela presença principalmente da hemicelulose, as quais determinam o nível de hidrofília e a resistência estrutural do material já que, a presença de grupos hidroxila livres, atraem moléculas de água do ambiente circundante por meio de ligações de hidrogênio (Gonçalves et al., 2015).

Os dados descritivos mostram que a média do coeficiente de absorção de água ao longo do tempo variou consideravelmente, sendo, por exemplo, ao início do experimento (48 horas) o núcleo apresenta um coeficiente de absorção de 357,36% (desvio padrão = 25,28), ao passar de 480 horas o núcleo manteve seu coeficiente de absorção de 386,71% (desvio padrão = 33,15). Essa variação sugere uma pequena oscilação ao longo do tempo, mas sem evidências de uma tendência estatisticamente significativa. O coeficiente β para o tempo foi negativo e pequeno (-0,044; p = 0,637), indicando que o aumento do tempo não impacta significativamente o comportamento de absorção de água do núcleo N1 (Tabela 2).

Tabela 2. Comparações múltiplas de média dos núcleos hidrorretentores confeccionados a partir de fibras naturais de Taboa (*Typha dominguenses*) e submetidos a testes de estresse hídricos por 480h

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Núcleo**  **hidrorretentor** | **Coeficiente de absorção de água (%)** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **48h** | | **96h** | | **144h** | | **192h** | | **240h** | | **288h** | | **336h** | | **384h** | | **432h** | | **480h** |
| **N1** | 338,966 | | 455,788 | | 351,715 | | 422,908 | | 340,384 | | 355,953 | | 460,189 | | 409,480 | | 324,567 | | 380,973 |
| **N2** | 353,816 | | 405,939 | | 405,168 | | 395,028 | | 345,664 | | 343,882 | | 460,421 | | 384,581 | | 356,222 | | 439,129 |
| **N3** | 218,997 | | 383,709 | | 308,532 | | 347,812 | | 283,213 | | 301,952 | | 446,834 | | 386,918 | | 362,295 | | 410,613 |
|  | **Expansão dimensional (%)** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | **48h** | **96h** | | **144h** | | **192h** | | **240h** | | **288h** | | **336h** | | **384h** | | **432h** | | **480h** | |
| **N1** | 2,299 | | 4,899 | | 2,154 | | 3,385 | | 1,657 | | 2,151 | | 2,394 | | 2,122 | | 1,386 | | 2,088 |
| **N2** | 3,421 | | 8,239 | | 2,673 | | 6,230 | | 11,927 | | 3,009 | | 3,315 | | 1,734 | | 1,692 | | 5,301 |
| **N3** | 1,644 | | 3,855 | | 5,602 | | 2,548 | | 1,135 | | 1,789 | | 7,779 | | 3,831 | | 5,063 | | 3,292 |
|  | **Variação dimensional total (%)** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | **48h** | **96h** | | **144h** | | **192h** | | **240h** | | **288h** | | **336h** | | **384h** | | **432h** | | **480h** | |
| **N1** | 29,901 | | 22,874 | | 18,666 | | 14,447 | | 16,439 | | 11,658 | | 4,446 | | 7,782 | | 11,382 | | 5,641 |
| **N2** | 18,148 | | 4,076 | | 2,345 | | 9,548 | | 6,984 | | 4,259 | | 2,072 | | 7,225 | | 4,608 | | 8,268 |
| **N3** | 24,011 | | 1,838 | | 3,054 | | 5,125 | | 4,532 | | 8,593 | | 0,181 | | 15,209 | | 4,764 | | 4,449 |

Os dados demonstram que o núcleo hidrorretentor composto por fibras de Taboa e aditivos naturais, apresenta um coeficiente de absorção de água (172% ± 10%) é superior ao coeficiente apresentado por outras fibras naturais comuns, tais como: fibra de Stipa (158%) (Dallel, 2012), linho (136% ± 25%) (Maslinda et al., 2017), cânhamo (158% ± 30%), sisal (200%), juta (281%) e coco (180%) (Dhakal et al., 2007; Sayeb et al., 2010).

Quanto aos dados de regressão, o núcleo drenante N1 apresentou baixa variância explicada pelo modelo de regressão (R² = 0,002) e a insignificância estatística (F(1,118) = 0,224; p = 0,637) Indicam que outros fatores – tais como atividade biológica e interações químicas no material, que são externos ao experimento – podem ter efeitos mais expressivos sobre o desempenho do hidrorretentor N1 combinado com aditivos, do que o tempo de exposição a variações de umidade e temperatura por si só.

O fato do núcleo hidrorretentor não apresentar influencia estatisticamente significativa em seu coeficiente de absorção de água pode estar relacionado à presença de barreiras químicas e estruturais do núcleo tais como a resina impermeabilizante e o espessante, que associadas com as fibras facilitam a penetração, porém dificultam a ocorrência de modificações estruturais resultante da contínua retenção hídrica nos espaços intersticiais, (Akter et al., 2020). Esse desempenho sugere que a ausência de influência temporal significativa pode estar relacionada à saturação da estrutura por água logo nos estágios iniciais, estabilizando sua resistência a tais intempereis ao longo do tempo.

Nesse contexto, Holanda, et al. (2024), em seus observou que em geotêxteis confeccionados a partir de fibras de *Typha* *latfolia* e *Typha* *dominguensis*, quando tratados com resinas naturais resistem mais às ações de degradação natural em comparação com geotêxteis não tratados cerca de 158% ± 20% que o não tratado. Estes aditivos podem ter atuados como camadas suplementares de proteção, minimizando o contato direto do núcleo com agentes externos e, consequentemente, aperfeiçoando sua estabilidade estrutural (Botvinova et al., 2020).

Já o núcleo N2 (sem resina), a análise de variância (ANOVA) demonstrou que o modelo é estatisticamente significativo (F(1,97) = 10,794; p = 0,001), confirmando a existência de uma relação relevante entre o tempo e o coeficiente de absorção de água. O modelo de regressão apresentou um coeficiente de determinação (R²) de 0,100, indicando que 10% da variância no coeficiente de absorção de água pode ser explicada pela variável independente (tempo).

Para o núcleo N3 (resíduos vegetais), assim como o N1 análise de variância confirmou que o modelo não foi estatisticamente significativo (F(1,118) = 0,203; p = 0,653), sugerindo que, assim como o N3, o tempo não exerce uma influência relevante sobre o coeficiente de absorção de água do núcleo. A constante (intercepto) foi estimada em 387,874, com intervalo de confiança de 95% entre 320,769 e 454,978. Isso sugere que, na ausência de qualquer variação no tempo, o coeficiente de absorção de água seria aproximadamente 387,874. Os coeficientes da regressão indicam que o coeficiente β para o tempo foi pequeno e não significativo (β = 0,041; p = 0,653).

Figura 14. Coeficiente de absorção de água dos núcleos hidrorretentores naturais confeccionados a partir de fibras de *Typha dominguenses*

Imagem em preto e branco

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Os coeficientes de expansão linear e de expansão total (Figura) foram avaliados, e os resultados da ANOVA demonstraram que o modelo não foi estatisticamente significativo para nenhuma das variáveis analisadas (F(1,118) =0,145;p=0,704F(1,118) = 0,145; p = 0,704F(1,118)=0,145;p=0,704 e F(1,118)=0,121;p=0,994F(1,118) = 0,121; p = 0,994F(1,118)=0,121;p=0,994, respectivamente). Esses valores indicam que não há evidência estatística suficiente para associar as variações observadas aos fatores experimentais considerados.

Esse comportamento pode estar associado às características intrínsecas das fibras vegetais da *Typha* (Taboa). Essas fibras possuem uma capacidade natural de absorver e reter grandes quantidades de água sem sofrer alterações significativas em sua estrutura inicial (Bonanno & Cirelli, 2017; Grace, 1989). Sendo uma planta que surge em ambientes alagados, apresenta neste sentido uma forte preferência por condições de alta umidade, adaptando sua matriz porosa, que facilita os mecanismos de capilaridade, promovendo tanto a rápida absorção inicial de água como a saturação em seu interior, sem comprometer a sua integridade física (Kamali Moghaddam, 2022).

Ainda, o comportamento observado pode ser atribuído à interação sinérgica entre a matriz de resina e as fibras vegetais de *Typha* (Taboa). As resinas a base de poliol, amplamente utilizadas como matrizes poliméricas, desempenham quando utilizadas como aditivos estruturantes podem influenciar na definição do comportamento mecânico e da estabilidade estrutural de compósitos (Cardoso & Balaban, 2013). No caso específico das resinas à base de poliuretanas, a introdução de grupos funcionais hidroxila, provenientes de fontes renováveis como o óleo de mamona ou a dietanolamina, contribui para um aumento significativo no grau de reticulação do material.

Figura 15. (a) Expansão linear e (b) Coeficiente de expansão total dos núcleos hidrorretentores naturais confeccionados a partir de fibras de *Typha dominguenses*

|  |  |
| --- | --- |
| Forma  Descrição gerada automaticamente com confiança média |  |

Esse aumento promove a formação de redes poliméricas interpenetrantes, que conferem aos compósitos maior resistência mecânica e estabilidade térmica, além de ampliar sua durabilidade em condições adversas (Kausar, 2019). Já que, a matriz polimérica, mesmo em ambientes de alta umidade, mantém sua integridade estrutural devido à capacidade de formar ligações cruzadas robustas (Zhang et al., 2021). Além disso, suas propriedades reológicas desempenham um papel fundamental ao promover a retenção de partículas e resistência a deformação plástica da fibra, reduzindo consideravelmente o impacto causado pela absorção de umidade (He et al., 2024). Essa resistência ao inchaço minimiza a geração de tensões internas nas fibras, prevenindo deformações e, consequentemente, garantindo a estabilidade do compósito ao longo do tempo estudado.

**Referências**

Abis, L., Loubet, B., Ciuraru, R., Lafouge, F., Houot, S., Nowak, V., Tripied, J., Dequiedt, S., Maron, P. A., & Sadet-Bourgeteau, S. (2020). Reduced microbial diversity induces larger volatile organic compound emissions from soils. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63091-8

Akter, N., Das, S. C., Grammatikos, S. A., Saha, J., & Khan, M. A. (2020). Development of sustainable jute geotextiles by bitumen emulsion and polyester resin: Effect of gamma radiation. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, *15*. https://doi.org/10.1177/1558925020957969

Betene, A. D. O., Betene, F. E., Martoïa, F., Dumont, P. J. J., Atangana, A., & Noah, P. M. A. (2020). Physico-Chemical and Thermal Characterization of Some Lignocellulosic Fibres: &amp;lt;i&amp;gt;Ananas comosus&amp;lt;/i&amp;gt; (AC), &amp;lt;i&amp;gt;Neuropeltis acuminatas&amp;lt;/i&amp;gt; (NA) and &amp;lt;i&amp;gt;Rhecktophyllum camerunense&amp;lt;/i&amp;gt; (RC). *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, *08*(04), 205–222. https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.84014

Bhattacharya, S. D., & Das, A. K. (2001). Alkali degumming of decorticated ramie. *Coloration Technology*, *117*(6), 342–345. https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2001.tb00087.x

Bonanno, G., & Cirelli, G. L. (2017). Comparative analysis of element concentrations and translocation in three wetland congener plants: Typha domingensis , Typha latifolia and Typha angustifolia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *143*, 92–101. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.021

Botvinova, O. A., Panov, Yu. T., & Romanov, S. V. (2020). Producing Bicomponent Sealants Based on Polyaspartate Urea Resins. *Polymer Science, Series D*, *13*(4), 407–413. https://doi.org/10.1134/S1995421220040048

Cardoso, O. R., & Balaban, R. de C. (2013). Preparação de Resinas de Poliuretana à Base de Óleo de Mamona e Dietanolamina e sua Aplicação em Circuitos Eletroeletrônicos. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, *23*(4), 552–558. https://doi.org/10.4322/polimeros.2013.003

César, N. R., Pereira-da-Silva, M. A., Botaro, V. R., & de Menezes, A. J. (2015). Cellulose nanocrystals from natural fiber of the macrophyte Typha domingensis: extraction and characterization. *Cellulose*, *22*(1), 449–460. https://doi.org/10.1007/s10570-014-0533-7

Cheng, L., Duan, S., Feng, X., Zheng, K., Yang, Q., Xu, H., Luo, W., & Peng, Y. (2020). Ramie-degumming methodologies: A short review. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, *15*, 155892502094010. https://doi.org/10.1177/1558925020940105

Cislaghi, A., Sala, P., Borgonovo, G., Gandolfi, C., & Bischetti, G. B. (2020). *Biodegradable Geosynthetics for Geotechnical and Geo-Environmental Engineering* (pp. 49–57). https://doi.org/10.1007/978-3-030-39299-4\_6

Dallel, M. (2012). *Evaluation du potentiel textile des fibres d’Alfa (Stipa Tenacissima L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil* [Université de Haute Alsace]. https://theses.hal.science/tel-00844129v1

Daria, M., Krzysztof, L., & Jakub, M. (2020). Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *268*, 122129. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122129

Deguenon, H. E. J., Guevara, N., Tometin, L. A. S., Guehou, M. S., Aina, M. P., & Sohounhloue, C. K. D. (2022). Influence of the Stage Number on the Quality of Domestic Waste Water Treated with Typha domingensis Filter Plants. *Chemical Science International Journal*, 1–10. https://doi.org/10.9734/CSJI/2022/v31i5819

Dhakal, H., Zhang, Z., & Richardson, M. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, *67*(7–8), 1674–1683. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019

Feng, J., Wang, R., Chen, Z., Zhang, S., Yuan, S., Cao, H., Jafari, S. M., & Yang, W. (2020). Formulation optimization of D-limonene-loaded nanoemulsions as a natural and efficient biopesticide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *596*, 124746. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124746

Gonçalves, A. P. B., Miranda, C. S. de, Guimarães, D. H., Oliveira, J. C. de, Cruz, A. M. F., Silva, F. L. B. M. da, Luporini, S., & José, N. M. (2015). Physicochemical, Mechanical and Morphologic Characterization of Purple Banana Fibers. *Materials Research*, *18*(suppl 2), 205–209. https://doi.org/10.1590/1516-1439.366414

Grace, J. B. (1989). Effects of water depth on Typha Latifolia and typha domingensis. *American Journal of Botany*, *76*(5), 762–768. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1989.tb11371.x

Grimes, R. (2019). *Potencial biológico de Trichoderma spp. em fungos fitopatogênicos em condições in vitro*.

Hadad, H. R., Mufarrege, M. de las M., Di Luca, G. A., & Maine, M. A. (2018). Long-term study of Cr, Ni, Zn, and P distribution in Typha domingensis growing in a constructed wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(18), 18130–18137. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2039-6

Haiming, T., Xiaoping, X., Chao, L., Xiaochen, P., Kaikai, C., Weiyan, L., & Ke, W. (2020). Microbial carbon source utilization in rice rhizosphere and nonrhizosphere soils with short-term manure N input rate in paddy field. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63639-8

He, L., Zhang, W., Liu, X., & Tong, L. (2024). Substantial improvement of thermal conductivity and mechanical properties of polymer composites by incorporation of boron nitride nanosheets and modulation of thermal curing reaction. *Polymer Composites*, *45*(3), 2215–2231. https://doi.org/10.1002/pc.27915

Hegazy, A. K., Abdel-Ghani, N. T., & El-Chaghaby, G. A. (2011). Phytoremediation of industrial wastewater potentiality by Typha domingensis. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *8*(3), 639–648. https://doi.org/10.1007/BF03326249

Holanda, F. S. R., Santos, L. D. V., Melo, J. C. R. De, Boge, G. M., Sussuchi, E. M., Nascimento, B. L., Santos, M. V. Q. dos, & Oliveira, M. I. U. de. (2024). Resistance of the fiber-derived geotextile from Typha domingensis submitted to field degradation. *Scientific Reports*, *14*(1), 8648. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56978-3

Holanda, F. S. R., Vidal Santos, L. D., Melo, J. C. R., Pedrotti, A., Sussuchi, E. M., Griza, S., Araújo Filho, R. N. de, & Nascimento, B. L. (2024). Influence of Sodium Hydroxide Treatment on Typha domingensis Fibers for Geotextile Manufacturing. *ACS Omega*, *9*(52), 51040–51051. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05602

Jian, Y., Chen, X., Ma, H., Zhang, C., Luo, Y., Jiang, J., & Yin, Y. (2023). Limonene formulation exhibited potential application in the control of mycelial growth and deoxynivalenol production in Fusarium graminearum. *Frontiers in Microbiology*, *14*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1161244

Jimenez, K. J., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Silva, Ê. F. F., & Pedrosa, E. M. R. (2021). Soil Physical Indicators of a Sugarcane Field Subjected to Successive Mechanised Harvests. *Sugar Tech*, *23*(4), 811–818. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00916-w

Kamali Moghaddam, M. (2022). Typha Leaves Fiber and Its Composites: A Review. *Journal of Natural Fibers*, *19*(13), 4993–5007. https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1870643

Kausar, A. (2019). Interpenetrating polymer network and nanocomposite IPN of polyurethane/epoxy: a review on fundamentals and advancements. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, *58*(7), 691–706. https://doi.org/10.1080/25740881.2018.1563114

Les, D. H. (2020). *Aquatic monocotyledons of North America : ecology, life history, and systematics* (1st ed., Vol. 1). Taylor & Francis e Books. https://doi.org/9781138054936

Maguire, J. D. (1962). Speed of Germination—Aid In Selection And Evaluation for Seedling Emergence And Vigor 1. *Crop Science*, *2*(2), 176–177. https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x

Maia, C. B., Rodrigues de Melo, P. A. F., Barreto, R. W., Maffia, L. A., Pinto, K. M. S., Rodrigues, A. A. C., de Souza Serra, I. M. R., Mesquita, M. L. R., Mondego, J. M., & da Silva, A. P. G. (2018). *Biological Potencial of Colletotrichum typhae H.C Greene mycoherbicide for Typha domingensis Pers*. https://doi.org/10.1101/502526

Maslinda, A. B., Abdul Majid, M. S., Ridzuan, M. J. M., Afendi, M., & Gibson, A. G. (2017). Effect of water absorption on the mechanical properties of hybrid interwoven cellulosic-cellulosic fibre reinforced epoxy composites. *Composite Structures*, *167*, 227–237. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.023

Okanlawon, F. B., Muiz, O. B., Ogunbamowo, P. O., Olaoye, K. O., Adelusi, F. T., & Areo, O. S. (2023). Treatment of Delonix regia wood with castor oil (Ricinus communis) protects it against white and brown rot fungi. *Bio-Research*, *21*(3), 2214–2222. https://doi.org/10.4314/br.v21i3.16

Oliveira, J. P. V., Pereira, M. P., Duarte, V. P., Corrêa, F. F., Castro, E. M., & Pereira, F. J. (2017). Cadmium tolerance of Typha domingensis Pers. (Typhaceae) as related to growth and leaf morphophysiology. *Brazilian Journal of Biology*, *78*(3), 509–516. https://doi.org/10.1590/1519-6984.171961

Onyelowe, K., Bui Van, D., Igboayaka, C., Orji, F., & Ugwuanyi, H. (2019). Rheology of mechanical properties of soft soil and stabilization protocols in the developing countries-Nigeria. *Materials Science for Energy Technologies*, *2*(1), 8–14. https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.10.001

Rezig, S., Jaouadi, M., Khoffi, F., Msahli, S., & Durand, B. (2023). Typha fiber reinforced polyester composites: tensile properties and statistical analysis. *The Journal of The Textile Institute*, *114*(5), 717–725. https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2066433

Saleh Muneera A, AL-Sodany Yassin M, Abdel Khalik Kadry N, & Eid Ebrahim M. (2019). Heavy metals accumulation and translocation by Typha elephantina roxb. and Typha domingensis pers. in an arid habitat: perspectives for phytoremediation. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *4*(1), 044–053. https://doi.org/10.30574/wjarr.2019.4.1.0088

Santos, L. D. V., Holanda, F. S. R., Pedrotti, A., Lino, J. B., dos Santos Fontes, C., de Melo, J. C. R., Marino, R. H., & Boge, G. M. (2024). Geogrid-type geotextile made from Typha domingensis fibers with high tensile strength for erosion control. *Invention Disclosure*, *4*, 100025. https://doi.org/10.1016/j.inv.2024.100025

Saraiva, V. da C., Almeida, B. M. de, Gomes, D. dos R. A., Araújo, M. dos S., Freitas, W. L. dos S., & Cruz, E. R. da. (2020). *Avaliação da fertilidade do solo e a supressão da mata ciliar de uma área do rio Parnaíba: impactos ambientais em uma perspectiva educacional*. BrazilianJournal of Development. https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/12271/10429

Sayeb, S., Marzoug, I., Hassen, M. Ben, Sakli, F., & Rodesli, S. (2010). Study of water sorption properties for esparto grass ultimate fibre (ALFA fibre). *Journal of the Textile Institute*, *101*(1), 19–27. https://doi.org/10.1080/00405000802194176

Silva, A. A., Silva Brito, L. P. da, Cavalcante, M. Z. B., Neto, J. A. P., & Cavalcante, Í. H. L. (2017). Reaproveitamento do resíduo da indústria de carnaúba no substrato para produção de mudas de melancia. *Cultura Agronômica: Revista de Ciências Agronômicas*, *26*(1), 10–20.

Soares, F. C., Russi, J. L., Dubal, Í. T. P., & Bortolás, F. A. (2020). Avaliação do efeito do estresse hídrico no desenvolvimento radicular e produção de pimenta ornamental/Evaluation of the effect of water stress on radicular development and ornamental pepper production. *Brazilian Journal of Development*, *6*(4), 21037–21045.

Sujatha, E. R., & Kannan, G. (2022). An Investigation on the Potential of Cellulose for Soil Stabilization. *Sustainability*, *14*(23), 16277. https://doi.org/10.3390/su142316277

Ulrich, A., Garcia, J. F., Delgado, G., Fagundes, B. F., & Bicca, A. M. O. (2017). Avaliação de substratos para produção de mudas de rúcula. *Anais Do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, *9*(2).

Zhang, W., Deng, H., Xia, L., Shen, L., Zhang, C., Lu, Q., & Sun, S. (2021). Semi-interpenetrating polymer networks prepared from castor oil-based waterborne polyurethanes and carboxymethyl chitosan. *Carbohydrate Polymers*, *256*, 117507. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117507