

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **PROPRIEDADES MECÂNICAS DE RAÍZES DE PISTIA STRATIOTES COM APLICAÇÕES EM ILHAS DE VEGETAÇÃO FLUTUANTE**

*Vanessa Maia Feitosa<sup>1</sup>; & Johannes Gérsen Janzen<sup>2</sup>*

#### **Abstract**

Floating treatment wetlands have emerged as sustainable solutions for water remediation in both urban and rural environments. The performance of these systems relies heavily on the mechanical behavior of the plant roots, especially their ability to adapt under flow-induced forces. This study aims to evaluate the mechanical response of *Pistia stratiotes* roots, focusing on their flexibility, deformation, and structural changes under light loads and different orientations. Laboratory experiments included the application of minor weights on root samples, both whole and segmented, while observing deformation behavior and calculating elasticity modulus. Results indicate that the roots display high flexibility and sensitivity to desiccation, significantly affecting mechanical measurements. The findings highlight the importance of quick sample handling and suggest improvements for future biomechanical testing protocols. This contributes to the broader understanding of plant-root mechanics within floating wetlands and their ecological functions in aquatic environments.

#### **Resumo**

As ilhas de vegetação flutuante são estratégias sustentáveis amplamente utilizadas para o tratamento de águas, com eficácia diretamente ligada ao comportamento mecânico das raízes das plantas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta estrutural das raízes de *Pistia stratiotes* frente a diferentes condições de carga e orientação, bem como os efeitos da desidratação em suas propriedades biomecânicas. Por meio de experimentos em laboratório, foram aplicadas pequenas cargas a raízes inteiras e segmentadas, observando-se a deformação e calculando-se o módulo de elasticidade. Os resultados evidenciaram que as raízes apresentam elevada flexibilidade e são extremamente sensíveis à perda de umidade, o que influencia diretamente na precisão das medições. Este estudo contribui

<sup>1</sup> Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Av. Costa e Silva | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande - MS | Telefone: +55 (67) 3345-7000, reitoria@ufms.br.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Av. Costa e Silva | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande - MS | Telefone: +55 (67) 3345-7000, reitoria@ufms.br.

para a compreensão das propriedades estruturais de plantas flutuantes e seu papel em sistemas de tratamento aquático.

**Palavras-Chave** – Raízes flutuantes; Escoamento Reconfiguração vegetal. *Pistia stratiotes*.

## INTRODUÇÃO

Ilhas de vegetação flutuante têm sido cada vez mais utilizadas como soluções sustentáveis para o tratamento de águas residuais e melhoria da qualidade da água em ambientes urbanos e rurais. Essas estruturas verdes funcionam como biofiltros naturais, promovendo processos de remoção de nutrientes, contaminantes e sedimentos por meio da interação entre as plantas, a microbiota associada às raízes e o meio aquático. A eficiência dessas ilhas está fortemente relacionada à capacidade das plantas que as compõem de resistir às forças hidrodinâmicas do escoamento e manter sua integridade estrutural.

Uma característica essencial dessas plantas flutuantes é a flexibilidade das suas raízes, que estão constantemente submetidas a forças de arraste e flutuação. Ao longo do tempo, as raízes podem sofrer deformações e reconfigurações que influenciam não apenas a resistência da ilha à correnteza, mas também os processos biológicos e químicos envolvidos no tratamento da água. Compreender o comportamento dessas raízes frente ao escoamento é fundamental para otimizar o projeto e a manutenção dessas ilhas vegetativas, garantindo seu desempenho sustentável e duradouro.

Nesse contexto, a análise da reconfiguração das raízes sob diferentes condições hidrodinâmicas permite compreender como a flexibilidade e a rigidez estrutural interagem para modular a resposta da vegetação. Esta capacidade de adaptação dinâmica não só minimiza o arrasto hidrodinâmico, protegendo a integridade das plantas, como também influencia a eficiência dos processos ecossistêmicos prestados pelas ilhas flutuantes. A seguir, são discutidos os principais parâmetros que controlam essa reconfiguração e os desafios associados à caracterização mecânica das raízes naturais.

As raízes apresentam flexibilidade. À medida que a velocidade do escoamento aumenta, essas raízes sofrem reconfiguração, assumindo uma postura mais alinhada com o fluxo, o que reduz significativamente o arrasto, em comparação com estruturas mais rígidas e estáticas. Essa capacidade de deformação não só influencia o arrasto hidrodinâmico, mas também afeta processos fundamentais para a saúde das plantas e para os serviços ecossistêmicos. Por exemplo, quando as raízes estão mais

dispersas, há maior interação com o escoamento, o que favorece a troca de nutrientes entre as raízes e a água. Por outro lado, quando as raízes se agrupam ou se alinham excessivamente com o escoamento, pode ocorrer sombreamento entre raízes próximas, afetando diretamente processos biológicos como a absorção de nutrientes. Dessa forma, há um claro mecanismo de retroalimentação entre o escoamento, a reconfiguração das raízes e os serviços ecossistêmicos prestados (Huang et al.; 2021).

A postura das raízes no escoamento é controlada por dois parâmetros adimensionais. O número de Cauchy (Ca) descreve a razão entre a força de arrasto e a força de restauração devido à rigidez flexural (Luhar & Nepf, 2014). Já a flutuabilidade adimensional (RB) descreve a razão entre as forças de restauração devidas à flutuabilidade e à rigidez (Stukulova et al.; 2012).

As expressões para esses parâmetros são dadas por:

$$C_a = \frac{\rho C_d f d u_m^2}{2EI} \quad (1)$$

Onde:

$C_a$ : Número de Cauchy adimensional, representa a razão entre forças de arrasto e forças de restauração elástica.

$\rho$ : Densidade do fluido (ex.: água), em kg/m<sup>3</sup>.

$C_d$ : Coeficiente de arrasto do objeto submerso (sem unidade).

$f$ : Fator de forma ou frequência associada ao objeto (dependente do contexto).

$d$ : Diâmetro ou largura da haste vegetal (m).

$u_m$ : Velocidade média do escoamento (m/s).

$E$ : Módulo de elasticidade de Young da planta (Pa ou N/m<sup>2</sup>).

$I$ : Momento de inércia da seção transversal da haste (m<sup>4</sup>).

$$RB = \frac{(\rho - \rho_v) g l^3 \pi \cdot \frac{d^2}{4}}{E \cdot I} \quad (2)$$

Onde:

RB: parâmetro adimensional de flutuabilidade (razão entre forças de flutuabilidade e forças de rigidez flexural).

$\rho$ : densidade do fluido (ex.: água), em kg/m<sup>3</sup>.

$\rho_r$ : densidade do tecido da raiz da planta, em kg/m<sup>3</sup>.

g: aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>.

l: comprimento característico da estrutura (m).

d: diâmetro da estrutura (m).

E: módulo de elasticidade do material da estrutura, em pascal (Pa ou N/m<sup>2</sup>).

I: momento de inércia da seção transversal da estrutura, em metros à quarta potência (m<sup>4</sup>).

Note que tanto no parâmetro de Cauchy quanto na flutuabilidade adimensional aparece o termo da rigidez flexural (EI) das raízes. Entretanto, a medição de EI em raízes naturais envolve uma série de desafios. Diferentemente de materiais homogêneos e isotrópicos, as raízes apresentam uma estrutura biológica altamente heterogênea, composta por tecidos com diferentes propriedades mecânicas e distribuição assimétrica de massa. Além disso, a presença de raízes secundárias, as variações no diâmetro ao longo do comprimento e as imperfeições estruturais afetam significativamente os resultados.

Outro fator crítico é a sensibilidade das raízes à perda de água, que altera rapidamente suas propriedades mecânicas, especialmente a rigidez. Esse efeito de desidratação, muitas vezes, ocorre em poucos minutos após a retirada do meio aquático, exigindo que os ensaios sejam realizados de forma rápida ou sob rigoroso controle de umidade. Adicionalmente, a própria definição do segundo momento de área (I) se torna complexa, uma vez que a geometria das raízes nem sempre se aproxima de formas regulares, o que introduz incertezas na determinação precisa de EI.

Além desses desafios, surge uma questão fundamental sobre qual elemento estrutural deve ser considerado na análise: uma raiz isolada ou o conjunto das raízes que compõem o sistema radicular da planta. Essa escolha não é trivial, pois diferentes configurações podem apresentar comportamentos mecânicos distintos frente às forças hidrodinâmicas. O entrelaçamento das raízes, a interação entre raízes primárias e secundárias e a distribuição espacial da biomassa podem influenciar tanto a rigidez efetiva quanto a forma como a vegetação responde às deformações impostas pelo escoamento. Essa incerteza se soma às dificuldades inerentes à caracterização de materiais biológicos, especialmente aqueles sujeitos a variações rápidas em suas propriedades devido a processos como a desidratação.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi obter uma avaliação inicial do comportamento mecânico das raízes de alface-d'água (*Pistia stratiotes*), por meio da análise da elasticidade e da deformação sob diferentes condições de orientação (vertical e horizontal) e aplicação de cargas leves. Além disso, buscou-se investigar os efeitos da desidratação rápida sobre a integridade estrutural e o comportamento flexural das raízes, considerando sua alta fragilidade e sensibilidade à perda de água. Os dados obtidos visam contribuir para a compreensão das propriedades mecânicas desse tipo de vegetação flutuante, especialmente no contexto de sua interação com o escoamento em ambientes aquáticos.

## METODOLOGIA

O experimento foi realizado em laboratório, seguindo as etapas descritas a seguir:

A planta de *Pistia stratiotes* foi coletada em um viveiro localizado no campus da UFMS (UFMS, 2024). Para o registro das imagens, um celular com câmera foi fixado em um tripé, garantindo a estabilidade e consistência dos registros fotográficos. A planta inteira foi inicialmente fotografada em sua posição natural, com o sistema radicular completo, para documentar sua forma e características iniciais (Imagens 1 e 2).



Imagen 1: *Pistia stratiotes* localizada no viveiro do campus da UFMS, com sua forma e partes.



Imagen 2: *Pistia stratiotes* no laboratório para estudo.

Em seguida, a planta foi posicionada e fixada em um suporte em balanço e suspensa horizontalmente, para observar deformações visíveis devido à mudança de posição (Imagens 3 e 4).

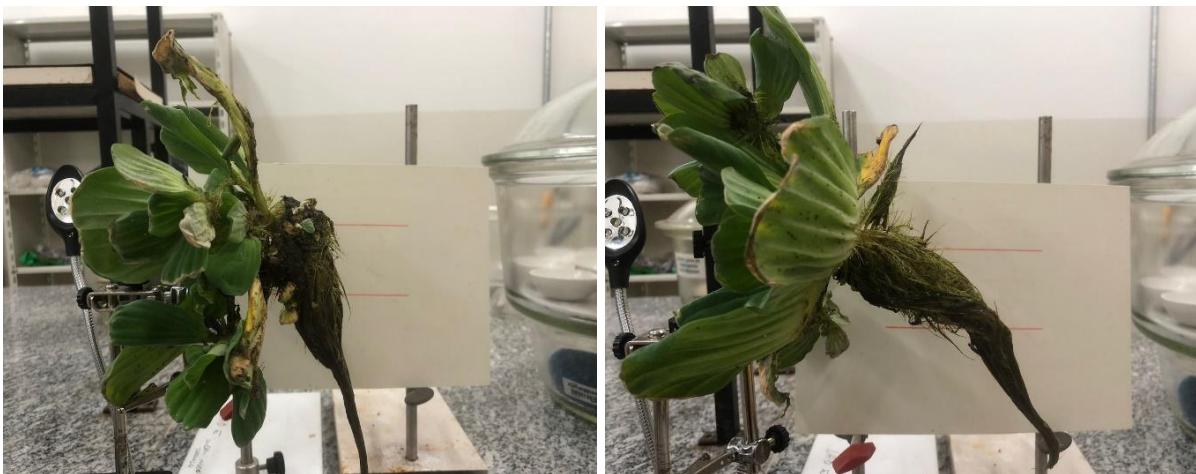


Imagen 3: *Pistia stratiotes* posicionada na horizontal.

Imagen 4: *Pistia stratiotes* após ser rotacionada mantendo a mesma posição.

Uma raiz inteira foi cuidadosamente extraída da planta para caracterização mecânica de flexão e carga suspensa, esta foi fatiada em três partes para separar a fatia que receberia aplicação de carga. Fotografias (Imagens 5 e 6), documentaram a resposta de cada segmento em comparação à raiz inteira.

As cargas foram aplicadas por meio de material leve, composto por duas argolas metálicas de 8 mm cada, para verificar a resposta estrutural a essas cargas externas. Após cada aplicação, novas fotografias foram registradas para análise da deformação.

O diâmetro da raiz da *Pistia stratiotes* utilizada no experimento foi estimado por meio do software *ImageJ*, a partir da análise de uma imagem ampliada da raiz (IMAGEJ, 2024). Três pontos ao longo do seu comprimento foram medidos, resultando em valores de 0,086 mm, 0,095 mm e 0,082 mm. A média dessas medidas forneceu um diâmetro aproximado de 0,087 mm, adotado nos cálculos do momento de inércia e módulo de elasticidade.

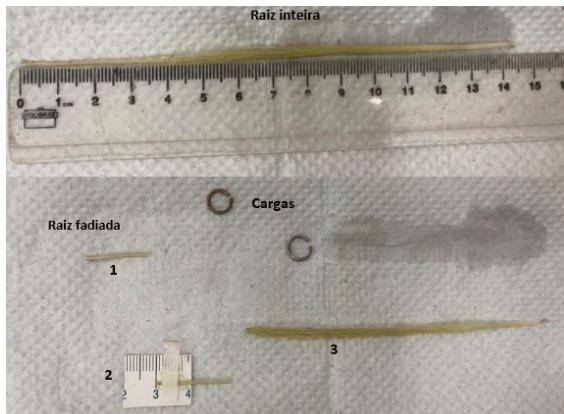


Imagen 5: Raiz e cargas utilizadas. Raiz inteira, depois fatiada em três partes e cargas duas argolas de ligação.



Imagen 6: Raiz fatiada suportando as duas cargas.

Assim, a raiz foi fixada horizontalmente por uma extremidade e submetida à aplicação das cargas de 0,2861 g (equivalente a 0,00281 N), suspensa na outra extremidade. A raiz apresentava comprimento de 1 cm e diâmetro aproximado de 0,087 mm. A partir de imagem obtida durante o experimento, foi possível estimar o deslocamento vertical da extremidade livre da raiz em cerca de 17 mm (0,017 m), medido com base em uma escala milimetrada visível na fotografia. Utilizando a equação clássica de flexão para viga engastada com carga concentrada na extremidade, e considerando o momento de inércia de seção circular maciça, o módulo de elasticidade (E) foi calculado em aproximadamente 72,5 Mpa, conforme cálculo apresentado abaixo:

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

Em que:

P: representa a carga aplicada;

L: é o comprimento da amostra;

E: é o módulo de elasticidade do tecido vegetal, assumido como  $1 \times 10^{-6}$  Pa;

I: é o momento de inércia da seção transversal circular da raiz, calculado por:

$$I = \frac{\pi r^4}{64}$$

Logo:

$$E = \frac{0,00281 \cdot (1,01)^3}{3 \cdot 7,6 \times 10^{-15} \cdot 0,017}$$

$$E = \frac{2,81 \times 10^{-8}}{3,876 \times 10^{-16}}$$

$$E = 72,5 \text{ MPa}$$

Esse valor está dentro da faixa esperada para tecidos vegetais flexíveis e confirma o comportamento estrutural típico de raízes de plantas aquáticas, que são adaptadas para flutuação e absorção, e não para sustentação mecânica rígida.

O peso de cada carga aplicada, bem como o peso da raiz inteira e de cada fatia (com e sem raízes secundárias), foram medidos com balança de precisão (Tabela 1).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As raízes da *Pistia stratiotes* apresentaram comportamento mecânico característico de tecidos biológicos frágeis, com deformações visíveis mesmo sob aplicação de cargas leves. A orientação da planta (vertical ou horizontal) influenciou a distribuição de rigidez e o padrão de deflexão das raízes, conforme observado nos registros fotográficos. Tal comportamento pode estar relacionado à plasticidade estrutural das raízes e à sua adaptação hidrodinâmica, uma vez que, em seu habitat natural, essas estruturas acompanham o fluxo da água (VOGEL, 1996; JONES; ELLIOTT, 2010).

Os dados de massa mostraram diferenças relevantes entre raízes com e sem secundárias, indicando a importância dessas na rigidez global do sistema. As fatias que continham raízes secundárias apresentaram pesos entre 0,015 g e 0,025 g, enquanto aquelas sem secundárias registraram valores significativamente menores (Tabela 1).

Adicionalmente, foi observada rápida desidratação das raízes após a retirada do meio aquático, comprometendo a análise mecânica. No presente estudo, o tempo entre a coleta e o ensaio foi de aproximadamente 40 minutos, já sendo suficiente para alterar propriedades estruturais da amostra. Recomenda-se, portanto, que esse intervalo não ultrapasse 15 minutos. Caso não seja possível cumprir essa janela, sugere-se manter a raiz imersa em água até o momento da fixação.

Considerando a fragilidade estrutural e a rápida desidratação, estudos futuros devem priorizar análises microscópicas imediatas para melhor compreensão da estrutura interna das raízes e seus efeitos na elasticidade e resistência mecânica. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de protocolos experimentais que reduzam a exposição ao ar, assegurando maior fidelidade nas medições de propriedades mecânicas.

Tabela 1: Pesos das estruturas das raízes e cargas aplicadas.

Material	Peso (g)	Comprimento (cm)	Diâmetro médio (cm)
Raiz inteira	0,1800	14,4	
Fatia 1	0,0126	2	0,0877
Fatia 2	0,0125	2	
Fatia 3	0,1436	10,4	
<b>COMPRIMENTO</b>			
Carga aplicada	0,2861	<b>(MM)</b>	-
		8	

## CONCLUSÃO

O experimento demonstrou que as raízes da *Pistia stratiotes* possuem estrutura mecânica frágil e suscetível à deformação sob pequenas cargas. O módulo de elasticidade obtido confirmou sua natureza flexível, compatível com tecidos vegetais aquáticos. Além disso, a orientação da raiz e a presença de raízes secundárias influenciaram a resposta estrutural, sugerindo que análises mais detalhadas devem considerar a morfologia completa do sistema radicular.

A desidratação rápida constitui um fator crítico que compromete a fidelidade dos resultados. Portanto, futuros estudos devem buscar formas de minimizar a exposição ao ar e, preferencialmente, incorporar métodos de análise imediata, como microscopia e controle de umidade. Os dados obtidos contribuem para a compreensão das propriedades biomecânicas das raízes de plantas aquáticas, fundamentais para o desempenho de ilhas de vegetação flutuante em sistemas de tratamento de água.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Johannes Gérsen Janzen, e ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LEEHS) da UFMS, pelo suporte técnico, orientação e infraestrutura essenciais para a realização deste trabalho. Expresso minha sincera gratidão ao Dr. Rodrigo Bahia Pereira, pós-doutorando vinculado ao projeto, pelo apoio técnico e pelas contribuições relevantes durante a condução do experimento. Agradeço também à aluna de graduação Luana Ramira da Costa, do curso de Engenharia Ambiental e integrante do PIBIC, pela colaboração prática e dedicação nas atividades laboratoriais. Por fim, deixo meu agradecimento especial à minha família, pelo incentivo e apoio constante ao longo desta jornada acadêmica.

## REFERENCIAS

- HUANG, Z. et al. Modelling of flexible aquatic plants from silicone syntactic foams. *Journal of Hydraulic Research*, v. 59, n. 2, p. 345-359, 2021.
- IMAGEJ. ImageJ: Image Processing and Analysis in Java. National Institutes of Health, USA, 1997–2024. Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij/> . Acesso em: 2 out. 2024.
- LUHAR, M.; NEPF, H. M. Wave-induced dynamics of flexible blades. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 743, p. 456-490, 2014.
- STUKOLOVA, E. et al. Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation. *Journal of Experimental Biology*, v. 215, p. 626-636, 2012.
- UFMS. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LEEHS. Campo Grande: UFMS, 2024.
- VOGEL, Steven. *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow*. 2. ed. Princeton: Princeton University Press, 1996.