



PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE FLUÊNCIA NA FLEXÃO DE COLMOS DE BAMBU E VIGAS DE BAMBU

Camilly Soares Moraes Peres (IC) e Alfonso Pappalardo Jr (Orientador)

Apoio: PIBIC CNPq

RESUMO

Este estudo investigou a fluência na flexão de vigas formadas por colmos de bambu (in natura) e bambu laminado colado (engenheirado), analisando suas propriedades mecânicas sob diferentes condições ambientais de temperatura e umidade. A metodologia envolveu ensaios de flexão e tração, com medições de força máxima, tensão aplicada e deslocamento até a ruptura. Os resultados indicaram que o bambu tem comportamento viscoelástico, com deformações contínuas sob carga constante, sensível às variações ambientais. No bambu engenheirado, a resistência variou conforme o adesivo utilizado, com cargas máximas de 28,50 kN e 23.50 kN, evidenciando a importância do processo de laminação. No bambu in natura, a anisotropia causou variações na resistência e no comportamento de fluência, com coeficientes de 1,4 para 40% da carga máxima e 1,8 para 60%. Concluiu-se que o bambu tem grande potencial como material estrutural sustentável, podendo substituir materiais convencionais como aço e concreto. Contudo, o controle das deformações ao longo do tempo permanece um desafio, especialmente em projetos de longa duração. Este estudo oferece dados importantes para o desenvolvimento de normas e metodologias que possam guiar a aplicação do bambu em construções, promovendo-o como uma alternativa ecológica e viável. Os resultados indicam a necessidade de mais pesquisas para padronizar o uso do bambu e garantir a segurança em aplicações estruturais.

Palavras-chave: Bambu, fluência, vigas.

ABSTRACT

This study investigated the creep behavior in the flexural strength of natural bamboo culms and engineered bamboo beams, analyzing their mechanical properties under different environmental conditions, such as temperature and humidity. The methodology involved flexural and tensile tests, measuring maximum force, applied stress, and displacement until rupture. The results indicated that bamboo exhibits viscoelastic behavior, with continuous deformation under constant load, sensitive to environmental variations. In engineered bamboo, strength varied according to the adhesive used, with maximum loads of 2850 kgf and 2350 kgf, highlighting the importance of the lamination process. In natural bamboo, anisotropy caused variations in strength and creep behavior, with coefficients of 1.4 for 40% of the

maximum load and 1.8 for 60%. It was concluded that bamboo has great potential as a sustainable structural material, capable of replacing conventional materials such as steel and concrete. However, controlling deformation over time remains a challenge, especially in long-term projects. This study provides valuable data for the development of standards and methodologies that can guide the application of bamboo in construction, promoting it as an eco-friendly and viable alternative. The results highlight the need for further research to standardize the use of bamboo and ensure safety in structural applications.

Keywords: Bamboo, creep, beams.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa realizada visa que o bambu é extremamente eficiente na captura de carbono e no cultivo por hectare comparado com a madeira de reflorestamento. Este material ecoeficiente é importante no combate ao aquecimento global e tem grande potencial como material de construção sustentável e para a economia circular (American Society of Testing Materials, 2021). Usado tanto em construções temporárias quanto de alto padrão, o bambu, especialmente o engenheirado, tem se destacado em projetos estruturais. A ASTM D5456 (American Society for Testing and Materials, 2021) apresenta terminologia específica para materiais compósitos de bambu, como vigas LVB e painéis OSBB, que têm menor impacto ambiental comparado a outros materiais de construção (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020; ZHONG, 2022). O bambu é anisotrópico, apresentando diferentes propriedades nas direções longitudinal, radial e circunferencial (CHAHROUR, 2021). É um biocompósito funcionalmente graduado, sensível à umidade, que pode afetar suas propriedades mecânicas (MA, 2022; LUAN, 2023). Sua alta resistência à tração e compressão o torna comparável a concreto, aço e madeira, e é objeto de intensa pesquisa, especialmente na China. O bambu cresce rapidamente, é renovável, absorve carbono e metais pesados, e protege o solo da erosão. No entanto, apresenta deformação lenta (fluência) sob carga mantida, o que pode comprometer seu desempenho, agravado por exposição às intempéries. O objetivo do projeto de pesquisa é obter curvas de fluência na flexão de colmos de bambu e bambu engenheirado, dependendo da temperatura e umidade relativa do ar, para diferentes níveis de carregamento.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Consiste em determinar como a fluência do bambu é influenciada por variáveis ambientais, como temperatura, umidade relativa atmosférica e absorção de água do meio ambiente.

Especificamente, a pesquisa busca responder como esses fatores afetam a fluência do bambu e qual é o período de observação necessário para que a fluência se manifeste sob um carregamento constante ao longo do tempo. Compreender essas relações é essencial para garantir a durabilidade e a eficiência do bambu em aplicações estruturais.

1.2 JUSTIFICATIVA

O bambu surge como uma alternativa viável para substituir o uso excessivo de aço e concreto como material estrutural. Em termos de suas características, o bambu exibe notável resistência e facilidade de manuseio, sendo equiparável ao aço, especialmente em termos de resistência à tração. Ele representa uma solução para a construção sustentável, contribuindo para a redução dos desafios ambientais enfrentados pela construção civil. Como um material ecologicamente correto, o bambu apresenta propriedades que se assemelham às de outros materiais tradicionais da construção civil, tornando-se uma alternativa mais econômica, com menor consumo de energia e benefícios ambientais substanciais.

Com base nesse raciocínio, o presente artigo tem como objetivo explorar o uso do bambu como material estrutural, em substituição aos materiais convencionais, por meio de uma análise teórica que aborda suas propriedades, limitações e benefícios na construção. Este estudo inclui um abrangente programa experimental com a realização de ensaios sob a ação de cargas de longa duração para a avaliação do comportamento viscoelástico do bambu, especificamente, os acréscimos das deformações viscoelásticas do material ao longo do tempo.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral é compreender e analisar o fenômeno da fluência na flexão de elementos estruturais de bambu em diferentes condições de exposição atmosférica, distinguindo os efeitos para colmos de bambu in natura e vigas de bambu engenheirado. Além disso, visa avaliar os impactos dessas variações nos projetos de estruturas de bambu. Os objetivos específicos são:

- Identificar e classificar os fatores e processos que podem impactar as propriedades do bambu ao longo da sua vida útil no projeto.
- Medir experimentalmente a deformação lenta do bambu em relação à umidade atmosférica e ao nível de carregamento constante durante o período de observação.



Estimar o coeficiente de fluência na flexão para colmos de bambu e vigas de bambu engenheirado, e identificar os possíveis modos de falha associados à fluência.

- Desenvolver uma metodologia para avaliações no Estado Limite de Serviço (ELS), com foco no Critério dos Deslocamentos Excessivos (ELS-DEF), considerando o impacto da fluência do bambu. Assegurar que a estética das construções de bambu não seja comprometida no Estado Limite Último (ELU) e garantir a segurança estrutural contra falhas relacionadas à fluência.
- Analisar estratégias para minimizar os impactos estéticos negativos da deformação lenta do bambu e superar as limitações atuais para grandes vãos.

1.4 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

As contribuições científicas e tecnológicas esperadas desta pesquisa são várias e significativas. Primeiramente, a pesquisa visa aumentar a qualidade dos projetos de estruturas de bambu, proporcionando uma compreensão mais detalhada dos fatores que afetam o desempenho estrutural desse material. Além disso, pretende-se desenvolver coeficientes de fluência específicos para espécies nativas brasileiras, levando em consideração as condições climáticas como temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

Outro direcionamento incide na redução da realização de manutenções frequentes, o que diminuirá a substituição de peças que atingem o estado limite de utilização. Por fim, busca-se promover o uso do bambu engenheirado em projetos estruturais, a partir da construção de uma base de resultados experimentais que comprovem suas vantagens e aplicabilidades.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BAMBU NATURAL E ENGENHEIRADO

O bambu natural é amplamente estudado por suas propriedades intrínsecas. Ziqin Zhong et al. (2022) analisaram o comportamento viscoelástico do bambu Mossô, a espécie mais cultivada na China, em flexão de longa duração. Este estudo incluiu ensaios estáticos e de fluência, essenciais para entender como o bambu se comporta sob cargas prolongadas. Mutaz K. Chahrour et al. (2021) focaram nos mecanismos de falha do bambu estrutural, utilizando análises microestruturais para observar trincas durante ensaios de tração e compressão. Xinxin Ma et al. (2022) investigaram as propriedades de fluência do bambu em diferentes escalas e sob várias condições de carga e umidade, revelando que a composição da parede externa do colmo influencia significativamente sua resistência e deflexão de



fluência. Nunes et al. (2021) discutiram a morfologia, propriedades físicas e mecânicas, além de vantagens e desvantagens do bambu natural. Eles também exploraram seu uso em pontes, telhados e pavilhões no Brasil, destacando os desafios e as limitações que ainda restringem sua aplicação mais ampla na construção civil. Bhavna Sharma et al. (2015) compararam as propriedades mecânicas de produtos de bambu engenheirado com madeira, concluindo que o bambu pode ser uma alternativa viável e sustentável, apresentando propriedades similares ou superiores. Tang, Zhou e Li (2021) avaliaram dois tipos de bambu engenheirado no mercado chinês, destacando a importância de padronizar esses materiais para garantir sua segurança em aplicações estruturais, conforme as normas ASTM. Matthew Penellum et al. (2018) estudaram o uso do bambu laminado em aplicações estruturais, comparando sua estrutura fibrosa com um compósito reforçado com fibras. Este estudo validou a teoria composta como base para o desenvolvimento de orientações futuras no uso do bambu laminado, destacando seu potencial para mudar a forma como os edifícios são construídos. Em suma, tanto o bambu natural quanto o engenheirado apresentam um grande potencial para a construção civil, combinando sustentabilidade e boas propriedades mecânicas. No entanto, para que o bambu seja amplamente adotado, é necessário superar desafios técnicos e padronizar seu uso em aplicações estruturais.

2.2 FENÔMENO DA FLUÊNCIA

A fluência é a deformação lenta e contínua de um material sob carga constante ao longo do tempo. No caso dos colmos de bambu, esse fenômeno é observado quando o bambu, após ser submetido a uma carga de flexão, continua a se deformar gradualmente sob a ação de cargas permanentemente aplicadas ao longo do tempo. Para estudar a fluência, o bambu é primeiramente preparado e testado para determinar sua resistência e módulo de elasticidade, conforme a NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020). Em seguida, o colmo é colocado em condições ambientais controladas e submetido a ensaios de fluência, aplicando uma fração da carga máxima de ruptura. A deformação do bambu é monitorada ao longo de um período. Durante esse período, são observadas manifestações patológicas como fissuras (até 1 mm), trincas (entre 1 mm e 3 mm) e rachaduras (acima de 3 mm). A fluência é quantificada para entender a taxa de deformação e para avaliar o coeficiente de fluência, que ajuda a prever o comportamento do bambu em uso estrutural. Se o bambu mostrar um esgotamento significativo da capacidade de carga ou um estado inaceitável de abertura de fissuras, isso indica falha estrutural. Para a avaliação de falhas e manifestações patológicas é referenciada a norma americana D 6815 (American Society for Testing and Materials, 2022).

2.3 NORMAS REGULAMENTADORAS

As normas regulamentadoras são essenciais para garantir a qualidade e segurança dos ensaios mecânicos do bambu. A NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), por exemplo, define métodos para avaliar propriedades como umidade, densidade, resistência à tração e compressão do bambu, assegurando que o material seja adequado para construção. A norma americana D2915 (American Society For Testing and Materials, 2021) é uma norma internacional que fornece diretrizes para a avaliação de bambu engenheirado, para atendimento dos padrões de qualidade e segurança em aplicações estruturais. Além dessas, normas da International Organization for Standardization (ISO) também são utilizadas na padronização dos ensaios e assegurar que o bambu e outros materiais compósitos atendam aos critérios globais de desempenho. Essas normas são fundamentais para validar o uso do bambu na construção civil de forma segura e eficaz.

2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O desenvolvimento sustentável do bambu destaca suas vantagens ambientais e econômicas. Estudos mostram que o bambu cresce rapidamente e é renovável, reduzindo a pressão sobre florestas e melhorando a qualidade do solo, conforme Nunes, Sobrinho Júnior e Pastor (2021). Hellena F. França et al. (2023) enfatizam sua capacidade de reduzir custos em construções rurais devido à sua abundância. Inovações como a compressão hidrotérmica, discutidas por Yu Luan et al. (2023), melhoram as propriedades mecânicas do bambu, tornando-o mais resistente e durável para uso estrutural. Vitor Hugo Silva Marçal (2018) e Xinxin Ma et al. (2022) destacam suas boas propriedades térmicas e acústicas, contribuindo para a eficiência energética dos edifícios. No entanto, para uma adoção mais ampla, é necessário superar desafios como a padronização e regulamentação, conforme ressaltado por Matthew Penellum et al. (2018) e Mutaz K. Chahrour et al. (2021). A educação e a capacitação de profissionais também são essenciais para integrar o bambu de forma segura e eficaz na construção civil.

3. METODOLOGIA

3.1 FATORES DE INFLUÊNCIA

Diversos fatores afetam as propriedades mecânicas das fibras de bambu, como a composição química e a estrutura das fibras, o teor de umidade e a idade do bambu (Chen et al., 2022). Chen et al. (2022) observaram que a remoção da hemicelulose reduz o módulo de



tração do bambu, embora não altere a estrutura celular. As fibras de bambu possuem uma estrutura celular complexa, com uma parede secundária multicamada (Osorio et al., 2011). Devido a essa complexidade, a lignificação e a orientação das microfibrilas variam entre as camadas da parede celular, resultando em mudanças significativas nas propriedades mecânicas entre camadas adjacentes (Pramudi et al., 2021).

A construção multicamada da parede celular contribui para uma maior resistência à fratura e facilita o deslizamento interno entre as camadas durante a tensão (Chen et al., 2022). Além disso, o ângulo das microfibrilas também influencia as propriedades mecânicas das fibras; em geral, a resistência à tração e o módulo da fibra aumentam com a diminuição do ângulo das microfibrilas (Chen et al., 2022). Portanto, a redução do ângulo das microfibrilas é um fator crucial que contribui para as excepcionais qualidades mecânicas das fibras de bambu.

3.2 ENSAIOS DE RUPTURA NA FLEXÃO DO BAMBU ENGENHEIRADO

Elementos de viga formados por Bambu Laminado Colado (GLUBAM) da espécie *Dendrocalamus asper*, com dimensões 50mm × 100mm × 1000 mm. O experimento foi conduzido em condições controladas no laboratório de materiais de construção, seguindo as diretrizes da norma ASTM D5456 (American Society for Testing and Materials, 2021). As medições ambientais foram registradas para garantir a precisão dos resultados, com a temperatura ambiente mantida a 24°C e a umidade relativa do ar registrada em 72%. O ensaio durou 18 minutos, conforme as diretrizes da norma, e foi realizado com instrumentação adequada, como termômetros e higrômetros calibrados, para assegurar a validade dos resultados.

3.2.1 Instrumentação

Para a realização do ensaio de ruptura na flexão foram utilizados a máquina de ensaios universal marca Amsler (capacidade de carga 60 t de origem Suíça) com os instrumentos célula de carga e régua potenciométrica, para o controle da carga aplicada pelo equipamento e a deflexão sofrida pelo modelo, respectivamente. O corpo de prova utilizado foi uma viga de bambu laminado da espécie *Dendrocalamus Asper*. Foi observado esmagamento transversal nos pontos de carga e apoio, sendo às fibras consideravelmente reduzida em comparação à resistência ao esmagamento paralelo. Recomendações técnicas foram feitas para minimizar o impacto do esmagamento lateral, como o uso de discos cilíndricos sobre placas de elastômero e evitar placas de apoio rígidas. Também foi indicado o uso de mecanismos específicos para prevenir a instabilidade lateral da viga e a aplicação de materiais

antiaderentes, como o teflon, para reduzir a fricção entre a barra guia e a estrutura da máquina.

3.2.2 Resultados

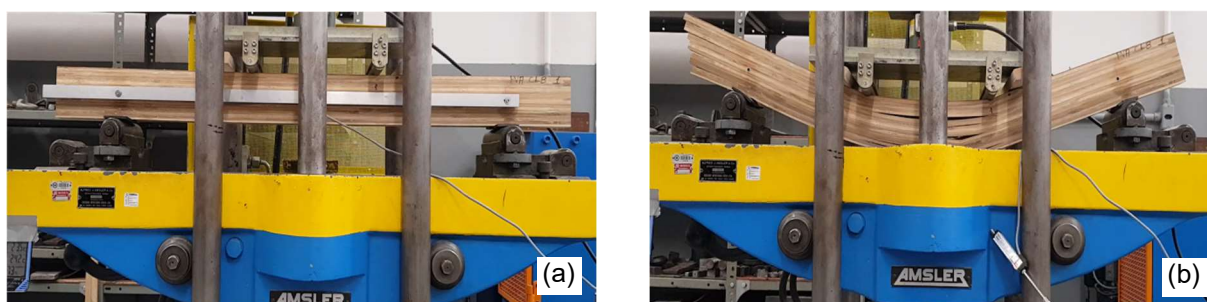
Os resultados dos ensaios mostraram que a viga PU CLB1 atingiu uma carga máxima de 2850 kgf, enquanto a viga PVA CLB1 suportou uma carga máxima de 2350 kgf. Esses resultados validaram a análise da falha por esgotamento da tensão de cisalhamento na junção entre o bambu e o adesivo, destacando a influência dos materiais e processos de laminação na resistência estrutural.

3.2.3 Sistema de Aquisição de Dados:

Para a obtenção de resultados do deslocamento e comportamento do corpo de prova, foram utilizados os softwares AqData e AqAnalysis, desenvolvidos pela empresa LINX. O AqData permite a coleta de informações de diversos dispositivos de medição, enquanto o AqAnalysis oferece recursos para a análise e visualização dos dados coletados. As referências utilizadas no estudo incluem a norma ASTM D 5456 (American Society for Testing and Materials, 2021) e a ABNT NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), que fornecem especificações e diretrizes para a avaliação de produtos de madeira laminada estrutural e para a determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu.

3.2.4 Fotografia do ensaio

Figura 1. Viga de bambu laminado no início e no final do ensaio.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

Figura 2. Ruptura por esgotamento de tensão de cisalhamento



Fonte: Acervo pessoal (2023).

3.3 ENSAIO DE RUPTURA NA FLEXÃO DO BAMBU IN NATURA

O ensaio de ruptura de bambu in natura, conforme relatado, segue as normas ABNT NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020). O ensaio foi realizado em três corpos de prova robustos da espécie *Bambusa Tuldoides*, utilizando o equipamento INSTRON EMIC 23-1M. A temperatura ambiente durante o teste foi de 23,9°C com umidade relativa do ar de 50%. O método de ensaio consistiu em aplicar uma carga no meio do vão, distribuindo essa força nos "nós" do bambu, com apoio nas extremidades.

3.3.1 Instrumentação

O teste de ruptura do bambu in natura foi realizado com o equipamento INSTRON EMIC 23-1M, que é fundamental para testes de resistência à flexão. Para aplicar a carga, foram utilizadas chapas de apoio nas extremidades dos corpos de prova e placas de madeira para distribuir a carga no centro do vão. Esse arranjo foi crucial para garantir a distribuição adequada da força nos nós do bambu, conforme exigido pelo método de ensaio. A velocidade do teste foi mantida constante em cerca de 0,5 mm/s, assegurando a uniformidade dos dados obtidos. A precisão na determinação da carga máxima foi de 10 N, garantindo a confiabilidade dos resultados.

3.3.2 Resultados:

Durante o ensaio, cada corpo de prova apresentou fissuras de várias dimensões:

- 1º Corpo de prova: Fissuras de 110,2mm, 58,04mm, 153,73mm, 97,70mm, 72,77mm, 28,52mm.
- 2º Corpo de prova: Fissuras de 85,35mm, 77,15mm, 62,55mm, 35,29mm.



- 3º Corpo de prova: Fissuras de 14,30mm, 64,13mm, 17,67mm, 15,97mm, 89,51mm.

Os resultados também indicaram o teor de umidade dos corpos de prova, variando entre 10,7% e 13,7%, com uma média de 11,6% e desvio padrão de 0,0112. As cargas máximas aplicadas e os resultados específicos de flexão para cada corpo de prova foram registrados, destacando:

Tabela 1 - Valores obtidos através do ensaio.

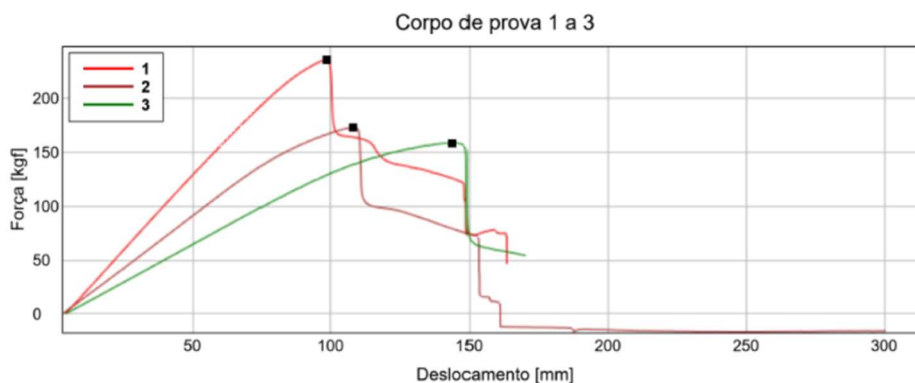
Corpo de prova	Força máxima (Kgf)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento (mm)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	236,18	44,82	18495,83	70,1
2	173,11	69,19	20229,69	111,8
3	158,85	73,17	27983,33	124,7
Coefficiente de variação	21,73	24,6	22,72	25,53
Desvio padrão	41,15	15,35	5052,03	28,54
Média	189,38	73,17	22236,29	111,8

Fonte: Acervo Pessoal (2024).

3.3.3 Sistema de Aquisição de Dados:

O sistema de aquisição de dados utilizado no ensaio foi o INSTRON EMIC 23-1M. Este equipamento está equipado com sensores de alta precisão que registram a força aplicada no corpo de prova e os deslocamentos correspondentes, permitindo determinar com exatidão a carga máxima e a tensão máxima que o material pode suportar antes de romper. Durante o ensaio, os dados foram coletados em tempo real, permitindo a observação das fissuras e deformações no bambu à medida que a carga era aplicada. Esse sistema de aquisição de dados é fundamental para análises detalhadas das propriedades mecânicas do bambu. A utilização do equipamento garantiu a precisão e a confiabilidade necessárias para o estudo das propriedades estruturais do bambu in natura, proporcionando uma base sólida para a interpretação dos resultados.

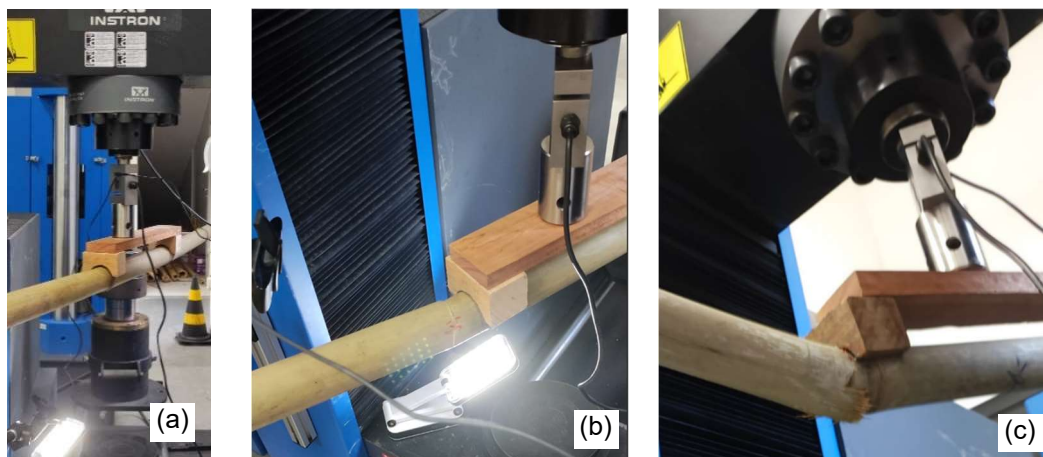
Gráfico 1 - Ensaio de flexão em 4 pontos



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

3.3.4 Fotografia do ensaio

Figura 4. Bambu in natura no início, durante e fim do ensaio de ruptura.



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

Figura 5. Medição de fissuras após ensaio com paquímetro eletrônico.



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

O ensaio de tração é fundamental para determinar as propriedades mecânicas de materiais, como resistência, ductilidade e módulo de elasticidade. Esses parâmetros são essenciais para avaliar a capacidade de um material de suportar cargas sem sofrer falhas ou deformações permanentes. No contexto do bambu laminado, o ensaio de tração paralela às fibras fornece informações cruciais sobre como o material se comporta sob cargas tensivas, especialmente considerando a presença de nós que podem afetar significativamente a resistência do material.

A importância do ensaio de tração se estende à sua influência sobre o ensaio de fluência. A fluência é o fenômeno de deformação lenta e contínua de um material sob tensão constante ao longo do tempo. Conhecer a resistência à tração e o módulo de elasticidade de um material permite prever como ele se comportará sob cargas prolongadas, essencial para

aplicações estruturais onde o material é submetido a tensões constantes. Além disso, a fluência é influenciada pela temperatura e pela umidade, fatores que também podem ser avaliados no ensaio de tração. O conhecimento das propriedades mecânicas básicas do material, obtidas no ensaio de tração, permite a elaboração de modelos mais precisos para prever a fluência, garantindo a segurança e a durabilidade de estruturas feitas com esse material.

3.4.1 Instrumentação

O ensaio de tração paralela às fibras do bambu laminado da espécie *Dendrocalamus Asper*, conforme as normas ABNT NBR 7190-6 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) e ABNT NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020). O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio Zwick Roell, operada sob a supervisão do técnico Luiz Henrique Polessi. Para a preparação dos corpos de prova, seis amostras foram confeccionadas, das quais três continham nós no centro da área ensaiada (denominadas 1C, 2C e 3C) e três estavam livres de nós (denominadas 1S, 2S e 3S). Para evitar o deslizamento durante o ensaio, as extremidades das amostras que seriam fixadas nas garras da máquina foram revestidas com EVA.

O ensaio foi conduzido a uma velocidade de 0,01 mm/s, conforme a especificação da norma ABNT NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020). As condições ambientais durante o ensaio incluíam uma temperatura de 23,9°C e uma umidade relativa do ar de 57%.

Figura 6. Amostras utilizadas para a realização do ensaio de tração.



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

Tabela 2 - Medidas da seção transversal das amostras.

Corpo de prova	Espessura (mm)	Largura (mm)
1S	4,63	6,43
2S	6,49	6,75
3S	4,73	6,19
1C	4,62	6,06
2C	5,43	6,8
3C	6,74	5,72



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

3.4.2 Resultados

Os resultados indicaram que duas das amostras sem “nós” (1S e 2S) apresentaram resultados inválidos, pois não romperam na área de ensaio. A amostra 3S apresentou um resultado válido, uma força máxima de 6675,81 N, uma tensão de 228,00 MPa e um deslocamento máximo de 8,00 mm. As amostras com “nós” (1C, 2C e 3C) apresentaram resultados válidos. A amostra 1C apresentou uma força máxima de 1972,3 N, uma tensão de 70,4 MPa e um deslocamento máximo de 5,00 mm. A amostra 2C apresentou uma força máxima de 6793,5 N, uma tensão de 184,0 MPa e um deslocamento máximo de 9,40 mm. A amostra 3C uma força máxima de 9098,7 N, uma tensão de 236,0 MPa e um deslocamento máximo de 11,30 mm.

Os resultados indicaram uma resistência média à tração paralela às fibras de 179,615 MPa e um módulo de elasticidade paralelo às fibras de 0,0209 GPa. Esses resultados demonstram a influência significativa da presença de nós na resistência e no deslocamento das amostras até a ruptura.

A análise dos dados revelou que a presença de nós nas amostras influenciou significativamente os resultados de resistência e deslocamento, com as amostras sem nós apresentando uma maior resistência e capacidade de deformação antes da ruptura. Os resultados forneceram uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações do bambu laminado em contextos estruturais, destacando sua viabilidade e desempenho como material de construção sustentável.

3.4.3 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados no ensaio de tração paralela às fibras do bambu laminado foi integrado à máquina Zwick Roell. Os dados coletados seguiram as normas da ABNT NBR 16828-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020) e foram exportados em formato TXT para análise posterior. Foram registradas medidas de força máxima, tensão aplicada (MPa) e deslocamento até a ruptura das amostras, considerando apenas os resultados válidos para garantir a precisão. Com base nesses dados, foram calculadas as principais propriedades mecânicas, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Esses cálculos ajudaram a avaliar o impacto dos nós na resistência e deformação das amostras, mostrando que as amostras sem nós tiveram maior resistência e capacidade de deformação antes da ruptura. Os resultados fornecem uma base sólida para pesquisas futuras e aplicações do bambu laminado em estruturas, reforçando seu potencial como material sustentável.

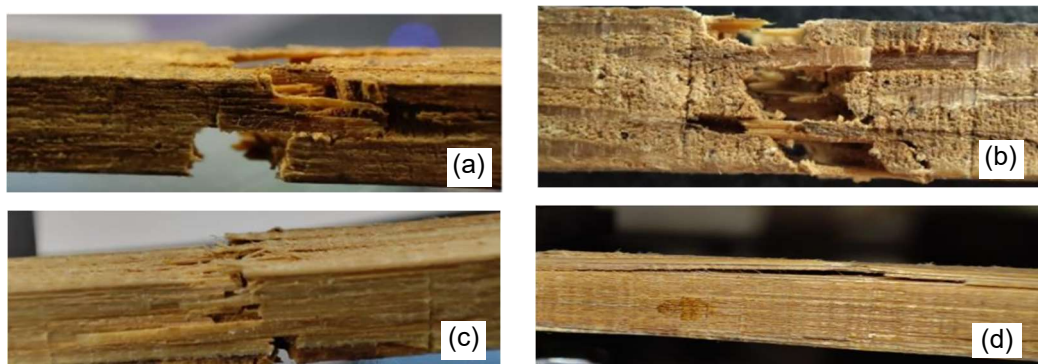
Tabela 3. Resultados do ensaio.

Corpo de prova	Força Máxima (N)	Resistência (MPa)	módulo de elasticidade (GPa)
3S	6675,81	228,00	0,0285
1C	1972,33	70,44	0,0141
2C	6793,50	184,01	0,0196
3C	9098,70	236,01	0,0209

Fonte: Acervo Pessoal (2024).

3.4.5 Fotografia do ensaio

Figura 7. Modo de ruptura das amostras



Fonte: Acervo Pessoal (2024)

3.5 ENSAIO DE FLUÊNCIA DO BAMBU NATURAL

O ensaio de flexão de estruturas de bambu in natura requer uma instrumentação precisa e adequada para garantir a coleta de dados confiáveis e a avaliação correta das propriedades mecânicas do material. No presente estudo, foram utilizados dois corpos de prova da espécie *Bambusa tuldoideis*, com o objetivo de analisar seu comportamento sob diferentes cargas de flexão e obter informações detalhadas sobre sua resistência estrutural.

O ensaio foi realizado em um ambiente controlado de laboratório, com condições específicas de temperatura e umidade para garantir a precisão dos resultados. O teor de umidade dos corpos de prova foi mantido em 10%, enquanto a temperatura ambiente estava fixada em 20°C e a umidade relativa do ar era de 65%. Essas condições foram selecionadas para simular um ambiente padrão e reduzir as variáveis que poderiam influenciar o desempenho do bambu durante o ensaio.

3.5.1 Instrumentação

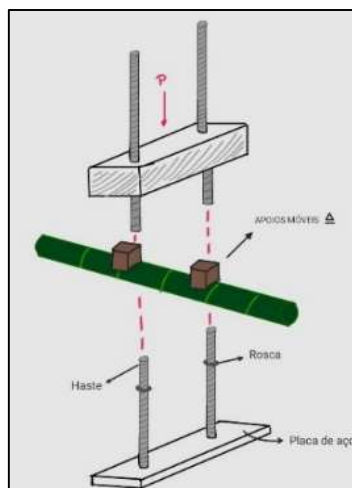
A máquina de ensaio de flexão foi utilizada para aplicar e medir as cargas de forma precisa e controlada, registrando os dados durante o teste. Pesos calibrados foram usados

para aplicar cargas de 40% e 60% da carga de referência de 240 kg, previamente determinada por um ensaio de ruptura na flexão, garantindo a consistência na aplicação das forças. O extensômetro foi empregado para medir a deformação dos corpos de prova, permitindo a observação precisa das mudanças dimensionais e a análise das respostas do bambu sob diferentes níveis de carga.

Um nível foi utilizado para assegurar que os corpos de prova estavam posicionados de maneira horizontal e estável durante o ensaio. Apoios de madeira foram estrategicamente posicionados para suportar os corpos de prova, distribuindo uniformemente as cargas e minimizando o impacto de imperfeições na superfície. Adicionalmente, um suporte composto por uma chapa pesada conectada a uma haste e rosca foi utilizado para evitar o tombamento dos corpos de prova, garantindo sua estabilidade durante o ensaio.

Os corpos de prova foram submetidos a cargas de 40% e 60% em relação à carga máxima de 240 kg. A aplicação das cargas foi monitorada pela máquina de suporte, enquanto as deformações foram medidas pelo extensômetro. A interação entre os pesos aplicados, a deformação observada e a resposta do bambu foram analisadas para determinar suas propriedades de flexão e a capacidade estrutural do material. A combinação desses equipamentos e condições experimentais possibilitou uma avaliação abrangente das propriedades mecânicas do bambu e sua aplicabilidade em construções estruturais.

Figura 8. Esquematização de ensaio



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

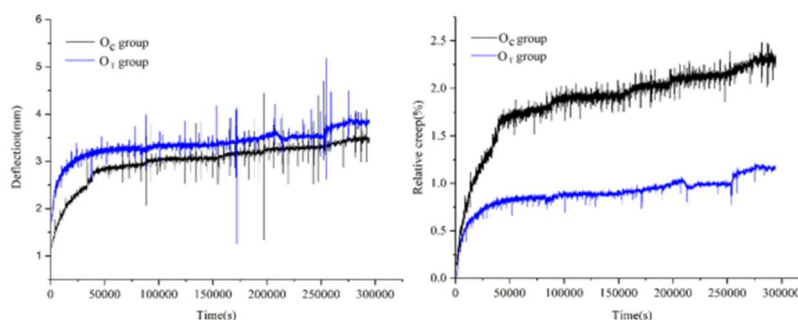
3.5.2 Resultados

Xinxin et al. (2022) apresentam os resultados do comportamento flexional para carga de longa duração em dois grupos de vigas formadas por tiras de bambu Mossô (gênero/espécie *Phyllostachys Edulis*) laminado colado com 4 anos de idade, apresentados na Figura 10. Os resultados da deflexão diferida ao longo do tempo por fluência na flexão foram realizados no período de 83 horas com 30% da carga de ruptura com umidade relativa 90% constante ao longo do ensaio.

No ensaio de fluência realizado com *Bambusa tuldooides*, os resultados mostraram que para uma carga aplicada de 40% da carga última (P_u), o coeficiente de fluência obtido foi de 1,4, enquanto para 60% da P_u , o coeficiente aumentou para 1,8. Esses resultados indicam que a deformação sob carga prolongada aumentou proporcionalmente à carga aplicada, evidenciando o comportamento sensível à fluência dessa espécie de bambu.

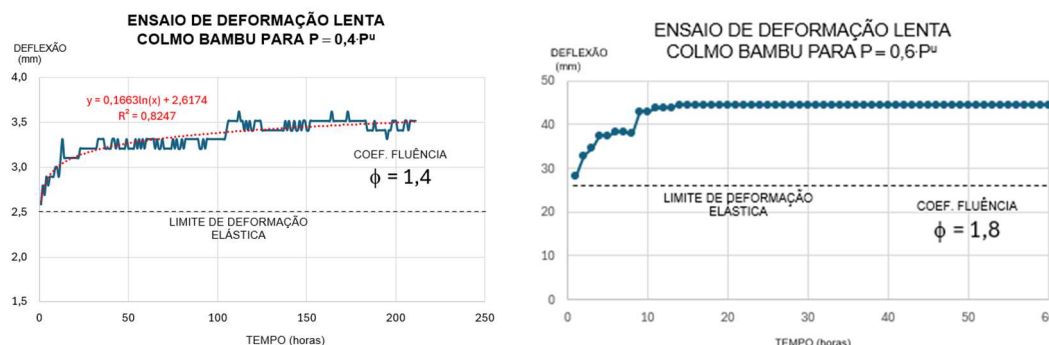
Esses dados foram comparados com os resultados apresentados por Xinxin et al. (2022), que avaliaram o comportamento à fluência em vigas de bambu Mossô (*Phyllostachys Edulis*) sob cargas de longa duração. O estudo de Xinxin et al. Foi realizado com dois grupos de vigas formadas por tiras de bambu Mossô, e os resultados também indicaram um aumento significativo nas deformações com o aumento das cargas aplicadas. A comparação sugere que, embora ambas as espécies apresentem comportamentos típicos de materiais viscoelásticos, *Bambusa tuldooides* tende a ser ligeiramente mais resistente à fluência em comparação com o *Phyllostachys Edulis*, especialmente em cargas mais elevadas. Os gráficos de fluência resultantes do ensaio de *Bambusa tuldooides* revelaram as fases clássicas de fluência. Esses resultados podem contribuir para uma melhor compreensão do desempenho de diferentes espécies de bambu sob cargas prolongadas, especialmente em aplicações estruturais.

Figura 9. Deflexão por fluência de dois grupos viga de bambu laminado colado



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

Figura 10. Deflexão por fluência do colmo de bambu



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

3.5.3 Sistema de Aquisição de Dados:

Para o ensaio de fluência, o Sistema de Aquisição de Dados Linx ADS 500 desempenha um papel crucial na coleta contínua e precisa de informações sobre as deformações ocorridas ao longo do tempo sob carga constante. O sistema é integrado ao software AqData, responsável pela aquisição de dados em tempo real, capturando as leituras dos sensores instalados na amostra testada. Essas leituras incluem variações de deformação e outros parâmetros relevantes durante o ensaio. Os dados adquiridos pelo AqData são processados e analisados utilizando o software AqAnalysis, que realiza o tratamento estatístico e gera gráficos de fluência versus tempo, permitindo a visualização das fases de fluência primária, secundária e terciária. Esse processo garante a precisão dos resultados e a apresentação de um relatório detalhado, facilitando a interpretação dos comportamentos mecânicos da amostra durante o ensaio de fluência.

A combinação desses programas e o sistema de aquisição de dados garantem a confiabilidade e a exatidão das medições, fundamentais para a análise do comportamento a longo prazo dos materiais submetidos a cargas constantes

3.5.5 Ensaio de fluência na flexão

Figura 12 – Comportamento dos colmos de bambu durante o ensaio.



Fonte: Acervo Pessoal (2024).



PROGRAMA INSTITUCIONAL DE
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de flexão do bambu, tanto natural quanto engenheirado, mostraram o comportamento mecânico do material sob diferentes condições de carga. No bambu engenheirado, a carga máxima variou bastante entre as vigas, dependendo do adesivo utilizado: a viga com adesivo PU suportou 28,50 kN, enquanto a com adesivo PVA suportou 23,50 kN, confirmando a importância do adesivo na resistência. Nos ensaios com bambu natural, as fissuras e a carga máxima aplicada variaram conforme as características dos corpos de prova. O coeficiente de variação ajudou a entender a distribuição dos esforços e a deformação sob carga. Gráficos e tabelas compararam os resultados com estudos teóricos, confirmando que o bambu natural apresenta variações devido à sua anisotropia, como discutido por Zhong (2022) e Ma (2022). A análise da fluência mostrou que o bambu tem comportamento viscoelástico, com deformações contínuas sob carga constante, o que reforça seu potencial como material sustentável, mas também aponta desafios no controle dessas deformações em projetos estruturais. Umidade e temperatura são fatores críticos que afetam a fluência, tanto nos ensaios quanto na teoria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou compreender o fenômeno da fluência em colmos de bambu in natura e vigas de bambu engenheirado, analisando seu comportamento sob diferentes condições de carga, temperatura e umidade. Os objetivos principais foram atingidos, pois conseguimos medir as deformações lentas do bambu e identificar os modos de falha associados à fluência, confirmando a sensibilidade do material às condições ambientais e à carga mantida ao longo do tempo. Os resultados demonstraram que tanto o bambu in natura quanto o engenheirado apresentam características viscoelásticas, com deformações contínuas sob carga constante.

A presença de umidade e variações de temperatura são fatores críticos que afetam significativamente o comportamento do bambu, como discutido no referencial teórico. A pesquisa também contribuiu com dados importantes sobre a resistência e as propriedades mecânicas do bambu, que podem auxiliar em futuros projetos estruturais, promovendo o uso desse material sustentável. Com base nos resultados, é evidente que o bambu tem grande potencial para ser utilizado como material de construção, especialmente em soluções ecoeficientes. No entanto, é necessário avançar em estudos para controlar as deformações ao longo do tempo, bem como desenvolver normas mais precisas para sua aplicação em larga escala.



6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5456**: Standard specification for evaluation of structural composite lumber products. West Conshohocken, PA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6815**: Evaluation of duration of load and creep effects of wood and wood-based products. West Conshohocken, PA, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-6**: Projeto de estruturas de madeira – Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16828-2**: Projeto de estruturas de bambu – Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

CHAHROUR, M. K.; HOSEN, M. A.; GOH, Y.; TONG, T. Y.; YAP, S. P.; KHADIMALLAH, M. A. failure mechanisms of structural bamboo using microstructural analyses. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, p. 1-10, 2021.

FRANÇA, H. F.; SILVA, C.; BRITO, G.; PAIXÃO, C. A. B. Dimensionamento de uma passarela de bambu: uma alternativa sustentável para obras em áreas rurais. **Revista UNICREA, Revista Técnico Científica da Universidade Corporativa do CREA/SC**, 1(1), 161–189, 2023.

LUAN, Y.; LIU, L.; MA, Y.; YANG, Y.; JIANG, M.; SEMPLE, K.; DAI, C.; FEI, B.; FANG, C. An integrated hydrothermal process of bamboo flattening, densification and drying: mechanical properties and strengthening mechanisms. **Materials and Design**, v. 226, p. 111610, 2023.

MA, X.; LUO, Z.; JI, C. H.; CAI, L.; FEI, B. Flexural creep behaviors of bamboo subjected to different gradient variation directions and relative humidity. **Industrial Crops and Products**, v. 179, p. 114679, 2022.

MARÇAL, V. H. S. **Análise comparativa de normas técnicas internacionais para o emprego do bambu-colmo em estruturas prediais**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 177p.

NUNES, G. da M.; SOBRINHO JÚNIOR, A. S.; PASTOR, J. dos S. O uso do bambu como material estrutural na construção civil. **Revista Principia**, v. 1, n. 55, p. 152, 2021.

OSORIO, L.; TRUJILLO, E.; VAN VUURE, A. W.; VERPOEST, I. (2011). Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of



bamboo/epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 5, 396–408. <https://doi.org/10.1177/0731684410397683>.

PENELLUM, M.; SHARMA, B.; SHAH, D. U.; FOSTER, R. M.; RAMAGE, M. H. Relationship of structure and stiffness in laminated bamboo composites. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 241-246, 2018.

PRAMUDI, G.; RAHARJO, W. W.; ARIAWAN, D.; ARIFIN, Z. (2021). Utilization of Bamboo Fiber in the Development of Environmentally Friendly Composite – A Review Utilization of Bamboo Fiber in the Development of Environmentally Friendly Composite – A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1096(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1096/1/012038>.

SHARMA, B.; GATÓO, A.; BOCK, M.; RAMAGE, M. Engineered bamboo for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 81, p.66-73, 2015.

TANG, S.; ZHOU, A.; LI, J. Mechanical properties and strength grading of engineered bamboo composites in China. *Advances in Civil Engineering*, v. 2021, p.1-13, 2021.

MA, X.; LUO, Z.; JI, C. H.; CAI, L.; FEI, B. (2022). Flexural creep behaviors of bamboo subjected to different gradient variation directions and relative humidity. **Industrial Crops and Products**, v. 179, p. 114679, 2022.

ZHONG, Z.; ZHOU, X.; HE, Z.; WANG, J. Creep behavior of full-culm Moso bamboo under long-term bending. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103710, 2022.

Contatos: camilly400@gmail.com e alfonso.pappalardo@mackenzie.br