

Tecnologia de Infusão a Vácuo Aplicada à Fabricação de Painéis Sanduíche Híbridos de Madeira/Vidro/Juta

Carlos Eduardo Pinheiro da Silva. ¹; Kelvin Techera Barbosa ²; Joziel Aparecido Cruz ³; Dionatan Orestes Ramos ⁴; Rafael de Avila Delucis ⁵; Sandro Campos Amico ²; Andrey Pereira Acosta ¹

¹ Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil ; ² Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil; ³ Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Blumenau/SC; ⁴ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS; ⁵ Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS - andrey.acosta@ufpr.br

Resumo: Este estudo desenvolveu um painel sanduíche de madeira por infusão a vácuo para melhorar o desempenho mecânico. Utilizaram-se lâminas de *Pinus elliottii*, juta, mantas de vidro, núcleo de espuma de PET e resina de poliéster. A caracterização incluiu densidade aparente e flexão estática edgewise. A densidade variou devido às camadas de vidro, que aprimoraram a penetração da resina. Os painéis GWGWG e GWJWG mostraram maior rigidez, adequados para aplicações estruturais, enquanto o WGJGW apresentou maior tensão nas fibras, menor rigidez e maior deformação, sendo mais flexível. O painel GWGWG teve menor resiliência, mas até 40% mais tenacidade que os demais.

Palavras-chave: Painel sanduíche de madeira, fibra de vidro, propriedades mecânicas, resina de poliéster.

Vacuum Infusion Technology Applied to the Manufacture of Wood/Glass/Jute Hybrid Sandwich Panels

Abstract: This study develops a wood sandwich panel by vacuum infusion to improve mechanical performance. *Pinus elliottii* veneers, jute, glass mats, PET foam core and polyester resin were used. Characterisation included bulk density and edgewise static bending. Density varied due to the glass layers, which improved resin penetration. The GWGWG and GWJWG panels showed greater stiffness, suitable for structural applications, while the WGJGW showed greater stress in the fibres, lower stiffness and greater deformation, being more flexible. The GWGWG panel had lower resilience, but up to 40 per cent more toughness than the others.

Keywords: Wood sandwich panel, fiber glass, mechanical properties, polyester resin.

1. INTRODUÇÃO

O aumento na adoção de materiais compostos de base renovável,

especialmente compostos de madeira, na construção civil é impulsionado pela necessidade de mitigar impactos ambientais e combater as mudanças climáticas. Segundo o USDA (2023), o mercado global de produtos de madeira cresceu de US\$ 696,78 bilhões em 2022 para US\$ 748,01 bilhões em 2023, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 7,4%. Espera-se que atinja US\$ 964,41 bilhões em 2027, com uma CAGR de 6,6%.

A madeira é amplamente utilizada em biomassa, produção de papel e celulose, e construção, devido a suas características únicas como conforto térmico, desempenho mecânico e leveza. No entanto, o consumo excessivo de madeira tem aumentado o desmatamento, especialmente em países como Brasil, China, Rússia e Estados Unidos. Um estudo da Mongabay (2023) prevê que o consumo global de madeira pode crescer 54% entre 2010 e 2050, resultando em desmatamento equivalente ao tamanho dos EUA continental e adicionando 3,5 a 4,2 gigatoneladas de CO₂ à atmosfera anualmente.

Nos setores acadêmico e industrial, diversos métodos foram desenvolvidos para atender à demanda por materiais renováveis com alto desempenho físico e mecânico, sendo a modificação da madeira uma solução promissora. Estudos investigaram técnicas como retificação térmica, modificação química, impregnação e fabricação de laminados, mas essas técnicas apresentam limitações, especialmente no desempenho mecânico, com melhorias de cerca de 50% na rigidez e resistência.

Recentemente, Acosta et al. (2023) demonstraram uma técnica promissora de fabricação de laminados de madeira de alto desempenho usando infusão a vácuo, resultando em uma penetração e retenção eficiente da resina na madeira. Os novos laminados produzidos apresentaram desempenho mecânico de até 300 vezes superior aos convencionais.

Portanto, a fabricação de painéis sanduíche de alto desempenho usando madeira como componente principal é uma perspectiva emergente, combinando baixa densidade com excelente desempenho mecânico. Estruturas sanduíche, consistindo em duas camadas externas rígidas e um núcleo leve, evoluíram significativamente no setor de construção. No entanto, as faces de madeira desses painéis têm limitações, como baixa resistência a condições climáticas adversas e alta absorção de água, levando à degradação das propriedades mecânicas ao longo do tempo. Com base nisso, o objetivo deste estudo é desenvolver um novo painel sanduíche à base de madeira usando o método de infusão a vácuo, visando obter um desempenho mecânico excepcional.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Matéria prima

Lâminas de madeira de *Pinus elliottii* (~1 mm de espessura, densidade de 0,59 g/cm³, umidade de 9,97% e porosidade de 49,25%) foram adquiridas da EcoFolhas (São Paulo, Brasil). Tecidos de juta unidirecionais (densidade de

240 g/m²) foram obtidos da Castanhal (Pará, Brasil) e designados como “W”. Mantas de fibra de vidro aleatórias (densidade de 400 g/m²) foram adquiridas da Owens Corning (Toledo, EUA) e designadas como “G”. Utilizou-se poliéster isoftálico insaturado (densidade de 1,19 g/cm³) como matriz de polímero, com iniciador Butanox 50 (1,5% em peso). A viscosidade da resina foi medida com um viscosímetro Brookfield (cone-placa CP-40) a 20 rpm em três temperaturas (20, 25 e 30 °C), variando de 146,5 a 205,4 cP. O tempo de gelificação foi de 53 minutos, com temperatura máxima de cura de 95,5 °C (ASTM D2471). Núcleos de espuma de PET de célula fechada (12 mm de espessura, Divinycell PN80) foram adquiridos da Barracuda® (Rio de Janeiro, Brasil).

2.2. Produção dos painéis sanduíche

As estruturas sanduíche foram fabricadas usando infusão a vácuo (VIP) à temperatura ambiente (~25 °C). Primeiro, aplicou-se cera de carnaúba no molde. Em seguida, posicionaram-se 5 folhas para a face inferior, o núcleo de PET de célula fechada e 5 folhas para a face superior. Dois espirodutos plásticos (250 mm cada) foram conectados às mangueiras de entrada e saída, criando uma área de injeção de 650 mm × 400 mm. A mangueira de entrada foi ligada a um béquero de 2 L com resina, e a mangueira de saída a um recipiente de pressão com uma bomba de vácuo. A área de injeção foi vedada com bolsa de vácuo e fita adesiva. A bomba de vácuo foi ativada para manter uma pressão constante de -92 kPa, garantindo um fluxo linear de resina. A Tabela 1 mostram a nomenclatura e espessuras dos painéis manufaturados.

Tabela 1. Nomenclatura dos grupos de painéis sanduíche fabricados no estudo.

Grupo	Nomenclatura
WGJGW/núcleo/WGJGW	WGJGW
GWJWG/núcleo /GWJWG	GWJWG
GWGWG/núcleo/GWGWG	GWGWG

2.3. Caracterização dos painéis sanduíche

A densidade aparente e a espessura das faces dos painéis sanduíche foram determinadas por medições de peso e tamanho dos painéis fabricados (7,5 × 20,0 × 2,0 cm³) usando uma balança analítica (precisão de 0,001 g) e um paquímetro digital (precisão de 0,01 mm). Em relação ao ensaio de flexão estática edgewise utilizou-se 5 corpos de prova por grupo nas dimensões de ~600 mm × 75 mm com base na norma ASTM D198. Após, foi possível determinar as propriedades de interesse, como o módulo de ruptura, de elasticidade, resiliência e tenacidade. O painel WGJGW apresentou espessura média de 18.16 (0.08^b) mm, espessura da face de 3.26 (0.08^a) e densidade de 608.81 (7.99^b), já o painel GWJWG 18,38 (0.2^b) mm, espessura da face de 3,17 (0.19^a) e densidade de 564,01 (10,31^b), por fim o painel GWGWG apresentou espessura média de 16.45 (0.33^a) mm, espessura da face de 3,17 (0.14^a) e densidade de 645.72 (16,66^c).

2.4. Análise estatística

Para todos os testes, a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos dados foram verificadas usando Shapiro-Wilk, respectivamente. Em seguida, foram aplicadas análises de variância (ANOVA) e, sempre que a hipótese nula foi rejeitada, foram usados os testes de Tukey para comparar as médias. Todas as análises estatísticas foram implementadas em um nível de significância de 5%.

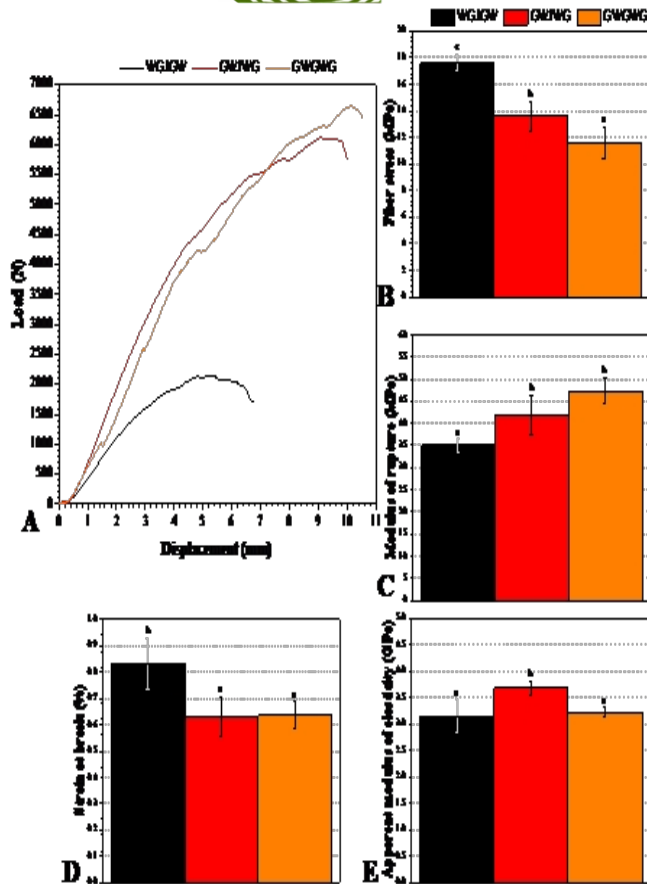
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados de flexão estática revelou padrões complexos na resposta mecânica dos painéis sanduíche. A tensão da fibra destacou a influência da fibra de vidro na resistência, enquanto o módulo de ruptura mostrou a sensibilidade à ordem das camadas.

A composição WGJGW, com uma lâmina de madeira próxima ao núcleo, apresentou falha devido à fragilidade da madeira de *Pinus* spp., corroborando estudos anteriores (Acosta et al. 2023). No teste de flexão Edgewise Fiber Stress, o WGJGW obteve a maior resistência (17 MPa), enquanto o GWJGW e GWGWG obtiveram 13 MPa e 11 MPa, respectivamente. No módulo de ruptura de borda, o GWGWG apresentou a maior resistência (46 MPa), seguido por GWJGW (42 MPa) e WGJGW (35 MPa) (Figura 1 B e C). Segundo Labans et al. (2019), painéis sanduíche construídos com faces de painéis compensados e núcleo de espuma poliuretano ou uma mistura de fibra de vidro com polipropileno, obtiveram resultados de resistência a flexão variando entre 20,5 e 26,15 Mpa, respectivamente. De acordo com Klímek et al. (2016), painéis sanduíche compostos por faces de painéis particulados com 5mm de espessura e núcleo composto por grades de painéis compensados com três camadas de madeira e 3mm de espessura, obtiveram resultados de resistência a flexão variando entre 8,66 e 11,19 Mpa em ensaios de flexão de três pontos.

Nesse caso do uso da infusão a vácuo o polímero preenche as células da madeira, promovendo uma distribuição eficiente das forças internas. A fibra de vidro melhora significativamente as propriedades mecânicas, indicando a necessidade de um equilíbrio entre os materiais.

Figura 1. Curvas representativas de carga versus deslocamento edgewise (A), tensão edgewise (B), módulo de ruptura edgewise (C), deformação na ruptura (D) e módulo de elasticidade aparente na flexão edgewise (E) (onde: letras diferentes acima das barras representam diferenças significativas).

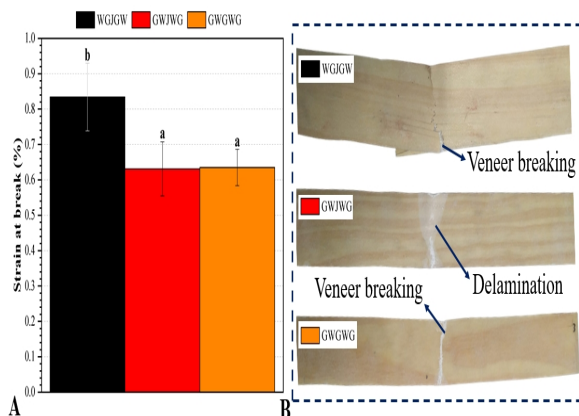


A análise da deformação na ruptura na borda revela a capacidade de deformação antes da falha para cada composição de painel sanduíche. A composição do WGJGW apresentou a maior deformação na ruptura (0,81%), enquanto o GWJWG e o GWGWG apresentaram 0,62% (Figura 2). A maior deformação do WGJGW é atribuída à interação entre a lâmina de madeira, a fibra de vidro e a fibra de juta, conferindo resistência e flexibilidade ao painel.

A composição WGJGW também mostrou resistência considerável à tensão da fibra e um módulo de ruptura competitivo, sugerindo sua vantagem em aplicações que exigem flexibilidade e resistência estrutural. Em contraste, GWJWG e GWGWG, apesar de menor deformação na ruptura, demonstraram alta resistência à tensão da fibra e ao módulo de ruptura, sendo preferíveis em contextos que priorizam a resistência estrutural.

De acordo com Silva et al. (2022) afirmam que, em laminados híbridos, a configuração ideal é posicionar mantas de vidro nas faces, pois as tensões de ruptura por flexão ocorrem principalmente nessas regiões, favorecendo o reforço interfacial entre mantas de vidro.

Figura 2. Modos de falha na flexão edgewise de cada grupo de painéis sanduíche fabricados para o estudo.



A análise da deformação do teste (Figura 2) revelou que a composição do GWJWG apresentou falha de delaminação, não atendendo à norma ASTM D198, enquanto o WGJGW e o GWGWG atenderam ao critério de falha. Acosta et al. (2023) relataram que o laminado GWJWG tinha menor resistência à compressão comparado ao WGJGW, destacando a importância das camadas intermediárias de mantas de vidro na resistência.

Os resultados do módulo de elasticidade aparente mostraram que o GWJWG obteve o maior valor (3,6 GPa), indicando maior rigidez em comparação com WGJGW (3,1 GPa) e GWGWG (3,2 GPa). Essa diferença é atribuída à rigidez de flexão e ao módulo de elasticidade aparente dos painéis com tecidos de vidro (Kerche et al. 2022). A incorporação de mantas de vidro nas faces dos painéis melhora as propriedades mecânicas, conforme estudos anteriores (da Silva et al. 2022).

Embora o WGJGW e GWGWG apresentem um módulo de elasticidade ligeiramente menor, ainda apresentam rigidez considerável, sendo adequadas para aplicações que priorizam a resistência estrutural. A composição do GWJWG destaca-se por sua maior rigidez e resistência geral, apesar de os padrões atuais não abrangerem totalmente esse tipo de material. Todas as composições atendem aos critérios essenciais para aplicações estruturais, onde a rigidez é crucial para a estabilidade sob cargas variáveis.

Ao analisar os resultados obtidos quando a resiliência e tenacidade (Tabela 2) o painel GWJWG apresentou a maior resiliência (2.04×10^4 J/m³), sugerindo maior capacidade de absorção de energia elástica, enquanto o WGJGW apresentou o maior valor de tenacidade (1.7×10^5 J/m³), demonstrando maior capacidade de absorver energia até a ruptura. O GWGWG apresentou tanto a menor resiliência (1.45×10^4 J/m³) quanto uma tenacidade similar ao WGJGW (1.64×10^5 J/m³), indicando que a ausência da juta reduziu a elasticidade, mas manteve a resistência ao impacto. Esses dados sugerem que a combinação de fibras de juta melhora a resiliência, enquanto a presença de madeira e vidro otimiza a tenacidade.

Tabela 2. Resultados de resiliência e tenacidade dos painéis sanduiche no ensaio de flexão edgewise (*letras diferentes representam diferenças significantes).

Grupo	Resiliência	Tenacidade
-------	-------------	------------

	(J/m ³)	(J/m ³)
WGJGW	1.75×10 ⁴ (1.65×10 ³ a)	1.7×10 ⁵ (2.49×10 ⁴ a)
GWJWG	2.04×10 ⁴ (4.67×10 ³ a)	1.1×10 ⁵ (3.04×10 ⁴ b)
GWGWG	1.45×10 ⁴ (1.09×10 ³ a)	1.64×10 ⁵ (2.17×10 ⁴ a)

Fonte: (Autores).

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o uso da infusão a vácuo se mostra promissor para a manufatura de painéis híbridos utilizando madeira nas faces. Todos os painéis sanduíche desenvolvido à base de madeira, utilizando infusão a vácuo, apresentaram desempenho mecânico variado conforme o arranjo das camadas. O painel GWGWG destacou-se pela alta tenacidade, tornando-o ideal para aplicações estruturais que demandam resistência a impactos, apesar de sua menor resiliência. Por outro lado, o painel WGJGW demonstrou maior flexibilidade, com menor rigidez e maior deformação, sendo mais indicado para situações que exigem adaptação a cargas variáveis. Assim, a escolha do painel deve ser orientada pelas exigências de rigidez ou flexibilidade de cada aplicação.

5. REFERÊNCIAS

ACOSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; SILVA, A. A. X. da; GATTO, D. A.; DELUCIS, R. de A.; AMICO, S. C. Vacuum infusion as a novel method to determine wood permeability. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 81, p. 33–44, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01887-3>.

ACOSTA, A. P.; DELUCIS, R. de A.; AMICO, S. C. Hybrid wood-glass and wood-jute-glass laminates manufactured by vacuum infusion. **Construction and Building Materials**, v. 398, p. 132513, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132513>.

KERCHE, E. F.; CALDAS, B. G. S.; CARVALHO, R. F.; AMICO, S. C. Mechanical response of sisal/glass fabrics reinforced polyester – polyethylene terephthalate foam core sandwich panels. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 24, p. 1993–2009, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1177/10996362221115057>.

MONGABAY. Timber harvests to meet global wood demand will bring soaring emissions: Study. Mongabay, 2023. Disponível em: <https://news.mongabay.com/2023/07/timber-harvests-to-meet-global-wood-demand-will-bring-soaring-emissions-study/>.

KLÍMEK, P.; WIMMER, R.; BRABEC, M.; SEBERA, V. Wood-based sandwich composite. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 195–208, 2016. Disponível em:

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/novel-sandwich-panel-with-interlocking-plywood-kagome-lattice-core-and-grooved-particleboard-facings/>

LABANS, E.; KALNINS, K.; BISAGNI, C. Flexural behavior of sandwich panels with cellular wood, plywood stiffener/foam and thermoplastic composite core. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 21, n. 2, p. 784–805, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1099636217699587>.

SILVA, R. V. da; VOLTZ, H.; FILHO, A. I.; MILAGRE, M. X.; MACHADO, C. de S. C. Hybrid composites with glass fiber and natural fibers of sisal, coir, and luffa sponge. **Journal of Composite Materials**, v. 55, p. 717–728, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1177/0021998320957725>.

DIAS, T. da C.; SILVA, A. A. X. da; TONATTO, M. L. P.; AMICO, S. C. Experimental Investigation on the Mechanical and Physical Properties of Glass/Jute Hybrid Laminates. **Polymers**, v. 14, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym14214742>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Solid Wood Products Annual 2023. **Foreign Agricultural Service**, 2023.