

Resistência ao cisalhamento de ligações compostas de pinus e eucalipto soldadas por fricção rotativa

Ana Carolina Costa Viana¹; Luisa Gabriela da Costa Peres¹; Renato Barbosa Sampaio²; Poliana Dias de Moraes¹; Walter Lindolfo Weingaertner³

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC, Brasil; ² Instituto Federal do Paraná (IFPR), Cascavel/PR, Brasil; ³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC, Brasil – anacarolviana@outlook.com

Resumo: Estudos relativos à soldagem por fricção rotativa (SFR) de madeiras plantadas no Brasil, como o pinus e o eucalipto, são recentes. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento das ligações soldadas considerando diferentes disposições dessas madeiras no substrato, pinus-eucalipto e eucalipto-pinus. Cavilhas de eucalipto foram inseridas a 55 mm de profundidade, 500 mm·min⁻¹ de avanço e 1000 rpm de rotação em pré-furos usinados nos substratos de pinus e eucalipto. Os resultados indicaram que a combinação eucalipto-pinus apresenta maior resistência ao cisalhamento média (4,13 MPa). Esse comportamento é, provavelmente, devido a maior permeabilidade do pinus, que compõe a peça A", região em que a ligação rompe. Isso favorece a impregnação do material fundido durante a SFR, contribuindo para a união cavilha-substrato. A taxa de conicidade das cavilhas (3% a 10%) permanece dentro dos padrões encontrados em outros estudos e não apresenta diferença estatisticamente significativa entre as combinações testadas.

Palavras-chave: Soldagem por fricção rotativa, *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna*/*Eucalyptus alba*.

Shear strength of pine and eucalyptus joints welded by rotary friction

Abstract: Studies on rotary friction welding (RFW) of planted woods in Brazil, such as pine and eucalyptus, are recent. This research aimed to evaluate the shear strength of welded joints considering different arrangements of these woods on the substrate, pine-eucalyptus and eucalyptus-pine. Eucalyptus dowels were inserted to a depth of 55 mm, a feed rate of 500 mm·min⁻¹ and a rotation of 1000 rpm, into pre-drilled holes machined in pine and eucalyptus substrates. The results showed that the eucalyptus-pine combination reveals the highest average shear strength (4.13 MPa). This behavior is, probably, due to the higher permeability of pine, which comprises piece A", the region where the joint breaks. This favors the impregnation of the molten material during RFW, contributing to the bonding between dowel-substrate. The average taper rate of the dowels (3% to 10%) remains within the patterns found in other studies and does not show a statistically significant difference between the tested combinations.

Keywords: Rotary friction welding, *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna*/*Eucalyptus alba*.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem por fricção rotativa (SFR) consiste em unir elementos de madeira por meio da inserção de cavilhas em pré-furos usinados nos substratos, com rotação e avanço determinados (Leban *et al.*, 2005). A SFR produz ligações sólidas, oriundas da fusão dos polímeros da madeira na interface de soldagem, contribuindo para a união da cavilha e do substrato, e, conseqüentemente, para o desempenho mecânico da ligação (Rodriguez *et al.*, 2010). A SFR é uma alternativa simples, rápida e efetiva para a fabricação de móveis e produtos de madeira engenheirada (Bocquet *et al.*, 2006; Pizzi, 2014). Segundo Pizzi (2014), as ligações SFR apresentam resistências comparáveis ou até superiores às obtidas por meio de adesivos.

A espécie de madeira, parâmetro relacionado ao material, influencia no desempenho mecânico da ligação SFR, devido às diferentes características anatômicas e composições químicas das espécies (Sun *et al.*, 2010). Estudos relativos à SFR de madeiras nativas e plantadas no Brasil utilizam espécies de pinus, eucalipto e itaúba, com densidades entre $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Schneid e Moraes, 2016; Viana *et al.*, 2024). O número de camadas do substrato, parâmetro relacionado ao processo de soldagem, geralmente varia entre um e dois (Viana, 2023).

Pesquisas relacionadas ao desempenho mecânico de ligações SFR em que os substratos são constituídos de duas camadas de madeira, geralmente, utilizam apenas uma espécie (Schneid e Moraes, 2016; Biwôlé *et al.*, 2022; Viana *et al.*, 2024). A avaliação do desempenho mecânico das ligações SFR, considerando mais de uma espécie de madeira para compor as camadas do substrato, ainda é pouco explorada. Foi encontrado apenas o estudo de Župčić *et al.* (2008), que soldaram cavilhas de faia em substratos com duas camadas de madeira, sendo uma de abeto, conífera, e outra de carvalho, folhosa. Os resultados de força máxima variaram entre 3,45 e 7,03 kN.

Dentre as madeiras provenientes de florestas plantadas no Brasil, destacam-se o pinus e o eucalipto, devido ao rápido crescimento, à capacidade de adaptação às diversas regiões e à boa aceitação pela indústria madeireira no beneficiamento de produtos (IBÁ, 2024). Pesquisas sobre a SFR do pinus e do eucalipto são recentes. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento das ligações soldadas devido ao arrancamento da cavilha, considerando diferentes disposições dessas madeiras no substrato, pinus-eucalipto e eucalipto-pinus.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Madeiras

As madeiras usadas na confecção dos corpos de prova foram de pinus (*Pinus taeda*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna/Eucalyptus alba*), com densidades aparentes médias de $606 \pm 10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $938 \pm 12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (12% de teor de umidade), respectivamente. O *Pinus taeda*, conífera, e o *Eucalyptus saligna/Eucalyptus alba*, folhosa, são madeiras de espécies exóticas, de florestas plantadas no Paraná. Optou-se por essas espécies devido à disponibilidade comercial e à comum aplicação na indústria moveleira e da construção civil.

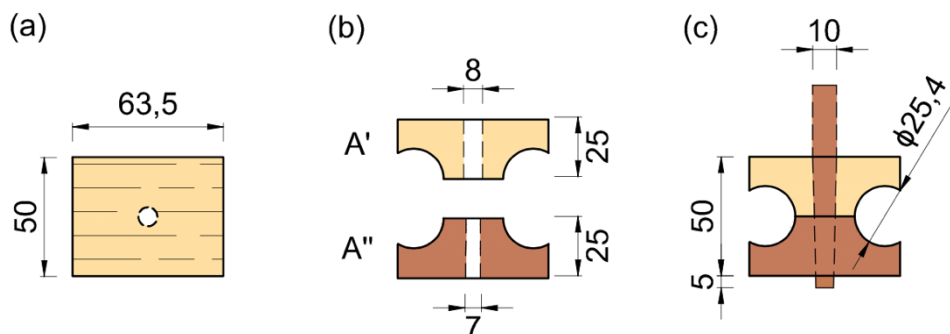
2.2 Amostras e corpos de prova

Nesta pesquisa, foram usadas 2 amostras, cada uma com 10 corpos de prova, os quais eram compostos por substratos de pinus e de eucalipto unidos por cavilhas de eucalipto (Tabela 1 e Figura 1). As cavilhas eram lisas, com 10 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. Os substratos eram constituídos por duas peças, A' e A'', com dimensões de 63,5 mm x 50 mm x 25 mm cada, adaptadas da norma brasileira NBR 7190-3 (2022) para ensaio de tração normal às fibras da madeira. Antes do processo de SFR, os corpos de prova foram condicionados a $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $60 \pm 5\%$ de umidade relativa (ISO 13061-17, 2017) até atingirem o teor de umidade de 12%.

Tabela 1. Amostras e corpos de prova

Grupo	Madeira da cavilha	Madeiras do substrato (peças A'-A'')	Número de corpos de prova
A	eucalipto	pinus-eucalipto	10
B		eucalipto-pinus	10

Figura 1. Dimensões dos corpos de prova (mm) (a) vista superior da peça A'; (b) vista frontal das peças A' e A''; (c) vista frontal após a SFR.



Fonte: (Autor)

Nas peças A' e A'', foram usinados pré-furos de 8 e 7 mm de diâmetro, respectivamente (Figura 1b), caracterizados como 2 estágios. Eles foram realizados no plano radial-tangencial do substrato, perpendicular às fibras e tangencialmente aos anéis de crescimento. Após o processo de SFR, os corpos de prova foram condicionados a 20 ± 2 °C e $60 \pm 5\%$ de umidade relativa (ISO 13061-17, 2017) por 7 dias, para que recuperassem o teor de umidade perdido durante a SFR.

2.3 Processo de soldagem

O processo de SFR consistiu em inserir cavilhas, a 55 mm de profundidade, nos pré-furos dos substratos, usando um centro de usinagem ROMI D600. A rotação das cavilhas foi de 1000 rpm e o avanço de $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, totalizando 7 s de soldagem. Durante a SFR, os corpos de prova permaneceram fixos em uma morsa.

2.4 Ensaio mecânico de tração

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos de tração, realizados em uma máquina universal de ensaios, aplicando uma força de tração paralela às fibras da cavilha e perpendicular às fibras do substrato, até o arrancamento da cavilha. O carregamento aplicado foi monotônico crescente, decorrente do deslocamento da travessa do equipamento a uma taxa de 2 mm/min. Durante o ensaio, os valores de força e de deslocamento foram registrados pelo sistema de aquisição de dados.

Os resultados de força máxima de ruptura obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova foram usados para a determinar a resistência ao cisalhamento ligação

soldada, que é expressa pela razão entre a força máxima de ruptura e a área da superfície SFR da peça A'', região em que a ligação se rompe (Equação 1).

$$\tau = F_{\text{máx}} / \pi \cdot d_{A''} \cdot h \quad (1)$$

sendo, τ a tensão de cisalhamento da superfície SFR, em MPa; $F_{\text{máx}}$ a força máxima de ruptura, em N; $d_{A''}$ o diâmetro adotado para a realização do pré-furo na peça A'', em mm; h a altura da peça A'', em mm.

2.5 Taxa de conicidade das cavilhas

A taxa de conicidade das cavilhas foi determinada a partir das medidas dos diâmetros da cavilha nas extremidades superior da peça A' e inferior da peça A'' e da altura do corpo de prova, usando um paquímetro com precisão de 0,01 mm. A taxa de conicidade foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$X = [(D - d)/h] \cdot 100 \quad (2)$$

sendo, X a taxa de conicidade da cavilha, em %; D e d os diâmetros da cavilha nas extremidades superior da peça A' e inferior da peça A'', respectivamente, em mm; h a altura do corpo de prova, em mm.

2.6 Análise estatística

A análise estatística dos dados de taxa de conicidade das cavilhas e de resistência ao cisalhamento da ligação soldada foi realizada considerando a disposição das madeiras do substrato, pinus-eucalipto e eucalipto-pinus, como variável independente. A normalidade e a homogeneidade dos dados foram verificadas por meio dos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente, ambos com 5% de significância (Field *et al.*, 2012).

Para a taxa de conicidade das cavilhas, a influência da disposição das madeiras do substrato foi avaliada por meio do teste não paramétrico de Mann-Whitney, visto que os dados não indicaram normalidade (Field *et al.*, 2012). Para a resistência ao cisalhamento da ligação soldada, a influência da disposição das madeiras do

substrato foi avaliada por meio do teste t de Student para amostras independentes, visto que os dados indicaram normalidade e homogeneidade (Field *et al.*, 2012). Os testes estatísticos foram realizados considerando 5% de probabilidade de erro.

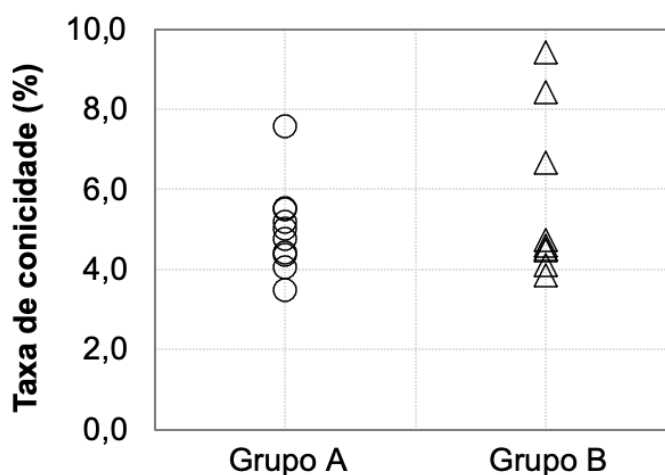
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na seção a seguir, são apresentados os resultados da taxa de conicidade das cavilhas e do desempenho mecânico das ligações SFR, considerando diferentes disposições das madeiras do substrato.

3.1 Taxa de conicidade das cavilhas

A Figura 2 ilustra a taxa de conicidade das cavilhas em função da disposição das madeiras do substrato. Os grupos A e B apresentam taxa de conicidade média das cavilhas e coeficiente de variação de 4,99% (22%) e 5,65% (36%), respectivamente. O teste não paramétrico de Mann-Whitney (Field *et al.*, 2012) indicou que não existe diferença estatisticamente significativa entre as medianas dos grupos.

Figura 2. Taxa de conicidade dos corpos de prova dos grupos A e B



Fonte: (Autor)

Segundo Kanazawa *et al.* (2005), a conicidade das cavilhas ocorre devido ao desgaste decorrente da força axial de compressão necessária para inserí-las nos pré-furos. Para o Grupo A, a taxa de conicidade se concentra, principalmente, entre 3% e 6%. Para o Grupo B, a taxa de conicidade demonstra maior variabilidade, com valores

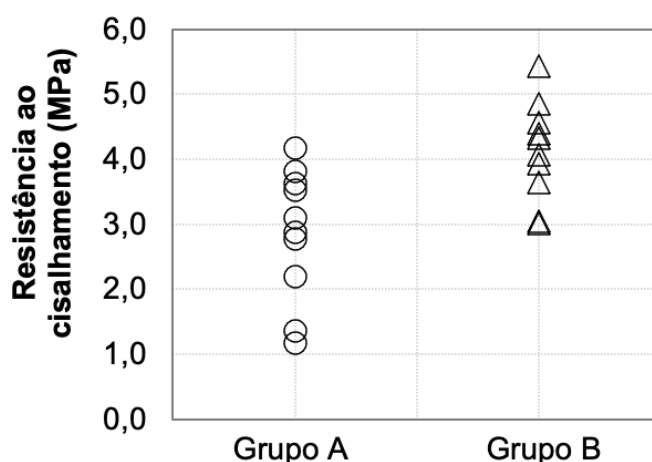
distribuídos entre 4% e 10%. A heterogeneidade natural da madeira é um fator que pode ter influenciado na variabilidade observada.

Verifica-se que as taxas de conicidade médias obtidas neste estudo se situam dentro da faixa de valores relatadas por Viana (2023), de 4,44%, para pinus-pinus, e de 5,90%, para eucalipto-eucalipto. Esse comportamento pode ser atribuído à combinação das madeiras dos substratos. A menor densidade do pinus facilita a inserção da cavilha no pré-furo, enquanto, a maior densidade do eucalipto causa maior desgaste na cavilha durante a soldagem, resultando em valores intermediários àqueles obtidos por Viana (2023).

3.2 Resistência ao cisalhamento das ligações soldadas

A Figura 3 ilustra a resistência ao cisalhamento das ligações soldadas, em função da disposição das madeiras do substrato. Os grupos A e B apresentam resistência ao cisalhamento média e coeficiente de variação de 2,86% (35%) e 4,13% (18%), respectivamente. O teste paramétrico t de Student (Field *et al.*, 2012) indicou que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos. Isso denota que a disposição das madeiras que compõem o substrato influencia no desempenho mecânico das ligações soldadas. Contudo, é fundamental ampliar as pesquisas sobre esse tema, a fim de otimizar o processo de SFR quando aplicado em madeiras plantadas no Brasil.

Figura 3. Resistência ao cisalhamento dos corpos de prova dos grupos A e B



Fonte: (Autor)

O melhor resultado de resistência ao cisalhamento média, de 4,13 MPa, é obtido para eucalipto-pinus (Grupo B). Esse comportamento pode ser atribuído provavelmente à maior permeabilidade do pinus, que compõe a peça A". Isso facilita a impregnação do material fundido nos poros e nas paredes celulares da superfície do substrato da peça A", região onde a ligação se rompe (Viana, 2023).

Župčić *et al.* (2008) obtiveram resistência ao cisalhamento média de 5,2 MPa ao soldarem cavilhas de faia a 50 mm de profundidade e rotação de 1520 rpm em pré-furos de dois estágios (8 e 6 mm de diâmetro), usinados em substratos compostos de duas camadas, sendo uma de abeto (peça A') e outra de carvalho (peça A"). Nota-se que os resultados de Župčić *et al.* (2008) são superiores aos obtidos nesta pesquisa. Essa diferença pode ser atribuída às espécies de madeira utilizadas e aos demais parâmetros de soldagem, como o diâmetro do pré-furo do substrato e a rotação.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na presente pesquisa permitem concluir que:

- a disposição das madeiras que compõem o substrato influencia significativamente o desempenho mecânico das ligações soldadas;
- a combinação eucalipto-pinus apresenta resistência ao cisalhamento média (4,13 MPa) superior à combinação pinus-eucalipto;
- a taxa de conicidade (3% a 10%) das cavilhas desta pesquisa é consistente com os padrões encontrados em outros estudos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às equipes do Laboratório de Mecânica (IFSC-Criciúma) e do NANOTEC (UFSC) pelo suporte técnico durante o processo de SFR e os ensaios de tração, respectivamente. O primeiro autor agradece à CAPES pela bolsa de doutorado (Código Financeiro 001).

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022.

BIWÔLÉ, J. J. E.; PIZZI, A.; MFOMO, J. Z.; *et al.* Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.) extracts: An ecological solution for improving the natural water durability of welded wood. **Industrial Crops and Products**. v.180, 2022

BOCQUET, J. F.; PIZZI, A.; RESCH, L. Full-scale (industrial) floor using welded-through dowels. **Journal of Adhesion Science and Technology**. v. 20, n. 15, p. 1727-1739, 2006.

FIELD, Andy; MILES, Jeremy; FIELD, Zoë. **Discovering Statistics Using R**. London: SAGE, 2012.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). IBÁ Annual Report. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13061-17**: physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens. Geneva, 2017.

KANAZAWA, F.; PIZZI, A.; PROPERZI, M.; *et al.* Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. **Journal of Adhesion Science and Technology**. v. 19, n. 12, p. 1025-1038, 2005.

LEBAN, J-M.; PIZZI, A.; PROPERZI, M.; *et al.* Wood welding: A challenging alternative to conventional wood gluing. **Scandinavian Journal of Forest Research**. n. 20, p. 534-538, 2005.

PIZZI, A. Wood joints adhesion and performance in mechanical friction welding of wood without adhesives. *In*: GUTOWSKI, W. V.; DODIUK, H. (ed.). **Recent advances in adhesion science and technology**. CRC Press: Boca Raton, 2014.

RODRIGUEZ, G.; DIOUF, P.; BLANCHET, P.; *et al.* Wood-dowel bonding by high-speed rotation welding -Application to two Canadian hardwood species. **Journal of Adhesion Science and Technology**. v. 24, p. 1423-1436, 2010.

SCHNEID, E.; MORAES, P. D. União de peças de madeira por meio da técnica de soldagem por fricção rotacional. *In*: XV EBRAMEM, 2016, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: IBRAMEM, 2016.

SUN, Y.; ROYER, M.; DIOUF, P. N.; *et al.* Chemical changes induced by high-speed rotation welding of wood - application to two canadian hardwood species. **Journal of Adhesion and Science Technology**. v. 24, p. 1383-1400, 2010.

VIANA, Ana Carolina Costa. **Soldagem das madeiras de pinus, eucalipto e itaúba por fricção rotativa**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

VIANA, A. C. C.; CAMPOS, C. E. M.; MORAES, P. D.; *et al.* Bond-line strength, chemical properties and cellulose crystallinity of welded pine and itauba wood. **Wood Material Science & Engineering**. v. 19, n. 1, p. 56-68, 2024.

ŽUPČIĆ, I.; MIHULJA, G.; BOGNER, A.; *et al.* Welding of solid wood. **Drvna Industrija**. v. 59, n. 3, p. 113-119, 2008.