

Ligações de eucalipto e itaúba soldadas por fricção rotativa: relação entre o desempenho mecânico e os parâmetros de soldagem

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 – anacarlolviana@outlook.com

Resumo: A soldagem por fricção rotativa (SFR) é uma alternativa promissora aos métodos tradicionais de união de elementos de madeira, como os conectores metálicos e os adesivos. Estudos referentes à SFR de madeiras nativas e plantadas no Brasil são incipientes, principalmente em relação à influência dos parâmetros de soldagem no desempenho mecânico das ligações. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da combinação das madeiras substrato-cavilha (eucalipto-itaúba e itaúba-itaúba) e da rotação (1000 rpm e 1500 rpm), na resistência ao cisalhamento das ligações soldadas. Cavilhas de itaúba foram inseridas a 55 mm de profundidade e 500 mm·min⁻¹ de avanço em pré-furos usinados em substratos de eucalipto ou itaúba. Os resultados indicaram que, para a combinação eucalipto-itaúba, os melhores resultados de resistência mecânica podem ser obtidos para 1500 rpm (1,00 MPa), enquanto, para a combinação itaúba-itaúba, os melhores resultados podem ser obtidos para 1000 rpm ou 1500 rpm (0,93 MPa).

Palavras-chave: Soldagem por fricção rotativa, *Mezilaurus itauba*, *Eucalyptus saligna*/*Eucalyptus alba*.

Eucalyptus and itauba wood joints welded by rotary friction: relationship between mechanical performance and welding parameters

Abstract: Rotary friction welding is a promising alternative to traditional methods of joining wood elements, such as metal connectors and adhesives. Research on RFW of native and planted woods in Brazil is limited, particularly regarding the influence of welding parameters on the mechanical performance of the joints. This research aimed to investigate the influence of substrate-dowel woods combination (eucalyptus-itauba and itauba-itauba) and the rotation (1000 rpm and 1500 rpm) on the shear strength of the welded joints. Itauba dowels were inserted to a depth of 55 mm and a feed rate of 500 mm·min⁻¹ into pre-drilled holes machined in eucalyptus or itauba substrates. The results showed that, for eucalyptus-itauba, the best mechanical strength results can be obtained for 1500 rpm (1,00 MPa), while, for itauba-itauba, the best results can be obtained for 1000 rpm or 1500 rpm (0,93 MPa).

Keywords: Rotary friction welding, *Mezilaurus itauba*, *Eucalyptus saligna*/*Eucalyptus alba*.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem por fricção rotativa (SFR) une elementos de madeira produzindo ligações sólidas, por meio da inserção de cavilhas em pré-furos usinados nos substratos, com rotação e avanço determinados (Pizzi, 2014). Essa técnica é economicamente vantajosa por ser simples, rápida, eficiente, além de dispensar o uso de adesivos, pregos ou parafusos (Pizzi, 2014). A SFR tem potencial para aplicação na indústria moveleira e de madeira engenheirada (Bocquet *et al.*, 2006; Pizzi, 2014).

Os parâmetros relacionados ao material, como a combinação das madeiras substrato-cavilha, influenciam no desempenho mecânico da ligação SFR, devido aos aspectos anatômicos e a composição química das espécies (Sun *et al.*, 2010). As madeiras comumente SFR são coníferas e folhosas, principalmente de florestas temperadas, com densidades entre $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Viana, 2023).

Os parâmetros relativos ao processo de SFR, como a relação diâmetro cavilha/pré-furo, o avanço e a rotação, contribuem para a geração de calor por atrito promovendo a fusão do material intercelular na interface de soldagem e posterior solidificação (Pizzi, 2014). As relações diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25 e 1,11 são as mais frequentes. O avanço possui uma ampla faixa, de $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e a rotação varia de 1000 rpm a 1500 rpm (Viana, 2023).

No Brasil, a indústria de madeira do segmento de móveis e da construção civil oferece uma variedade de produtos constituídos de diferentes espécies florestais (ABIMCI, 2024). Dentre as madeiras de florestas nativas, destaca-se a itaúba, que possui altas densidade e durabilidade. Dentre as madeiras provenientes de florestas plantadas, destaca-se o gênero eucalipto, devido ao rápido crescimento e à capacidade de adaptação às diversas regiões (ABIMCI, 2024; IBÁ, 2024). Estudos referentes à SFR de madeiras nativas e plantadas no Brasil, provenientes de florestas tropicais, são incipientes, indicando a necessidade de aprofundamento no tema. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência da combinação das madeiras substrato-cavilha (eucalipto-itaúba e itaúba-itaúba) e da rotação (1000 rpm e 1500 rpm) na resistência ao cisalhamento das ligações soldadas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção do material

As madeiras usadas na confecção dos substratos e das cavilhas foram de itaúba (*Mezilaurus itauba*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna/Eucalyptus alba*), com densidades aparentes médias de $824 \pm 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $938 \pm 12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (12% de teor de umidade), respectivamente. A itaúba, folhosa, é uma espécie nativa brasileira, de florestas do Mato Grosso. O eucalipto, folhosa, é uma espécie exótica, de florestas plantadas no Paraná. Optou-se pelas espécies citadas em virtude da disponibilidade comercial e da comum aplicação na indústria moveleira e da construção civil.

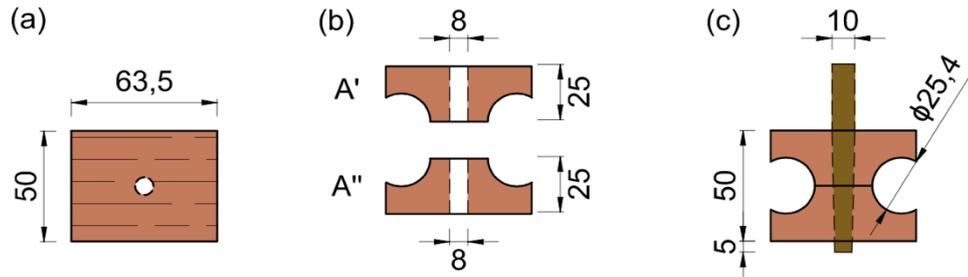
2.2 Amostras e corpos de prova

Foram usadas 4 amostras compostas por 5 corpos de prova cada (Tabela 1). As cavilhas eram lisas, de itaúba, com 10 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. Os substratos eram de eucalipto ou de itaúba, compostos por duas peças, A' e A'', com 63,5 mm × 50 mm × 25 mm cada (Figura 1), 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	A	B	C	D
Madeiras substrato-cavilha	eucalipto-itaúba		itaúba-itaúba	
Rotação (rpm)	1000	1500	1000	1500
Número de corpos de prova	5	5	5	5

Figura 1. Dimensões dos corpos de prova em milímetros



Fonte: (Autor)

Nas peças A' e A'', foram usinados pré-furos de 8 mm de diâmetro, 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 foi realizado por meio de um centro de usinagem comandado numericamente. As cavilhas foram soldadas nos pré-furos dos substratos a 55 mm de profundidade, com rotação de 1000 rpm ou 1500 rpm e avanço de $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, resultando em um tempo de soldagem de 7 s.

2.4 Ensaio mecânico de tração

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração, cuja força foi aplicada paralelamente às fibras da cavilha e perpendicularmente às fibras do substrato, até o arrancamento da cavilha. O carregamento aplicado no corpo de prova 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.

A tensão de cisalhamento da superfície SFR foi determinada a partir da razão entre a força máxima verificada no ensaio de tração dos corpos de prova e a área da superfície SFR da peça A'', região em que a ligação se rompe (Equação 1).

sendo, a tensão de cisalhamento da superfície SFR, em MPa; a força máxima, em N; o diâmetro do pré-furo na peça A”, em mm; h a altura da peça A”, em mm.

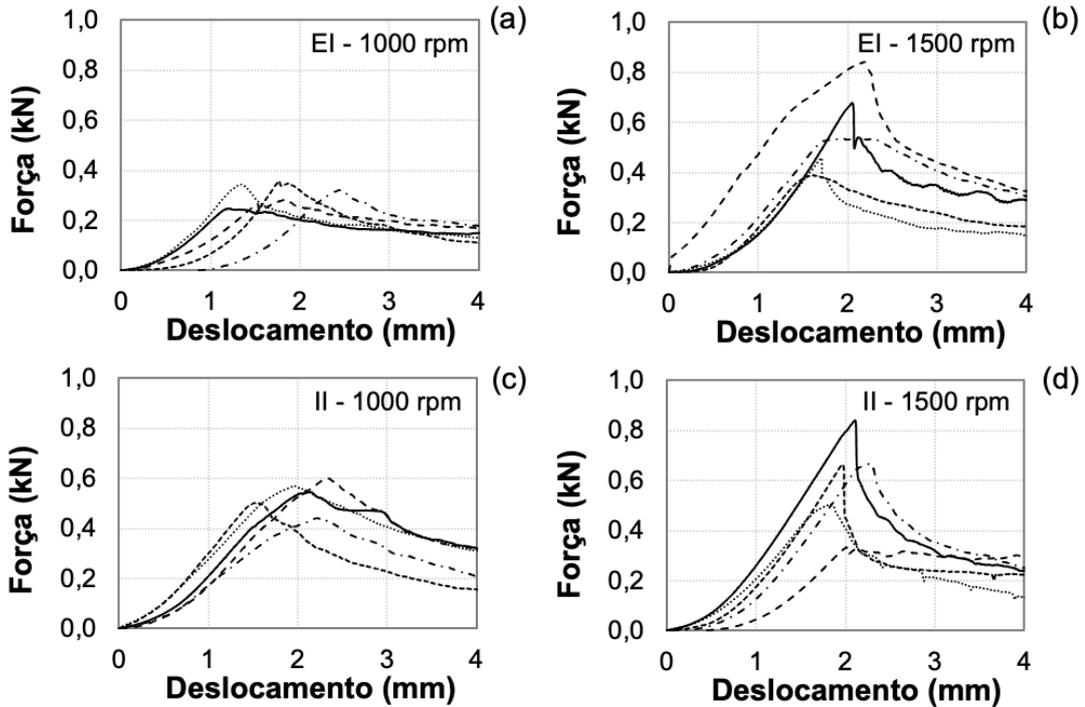
2.5 Análise estatística

Os resultados relativos à resistência ao cisalhamento da ligação soldada foram analisados estatisticamente. As variáveis independentes eram a combinação das madeiras substrato-cavilha (eucalipto-itaúba e itaúba-itaúba) e a rotação da cavilha (1000 e 1500 rpm). A variável dependente foi a resistência ao cisalhamento da ligação soldada. Inicialmente, foi verificada a normalidade e a homogeneidade dos dados referentes à variável dependente, a partir dos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente, com 5% de significância (Field *et al.*, 2012). Posteriormente, a avaliação da influência da combinação das madeiras substrato-cavilha e da rotação, na resistência da ligação soldada, consistiu em aplicar o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Conover para comparação das medianas dos grupos (Field *et al.*, 2012), visto que os dados não apresentaram homogeneidade. Esses testes foram realizados considerando 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 ilustra as curvas força × deslocamento da travessa da máquina de ensaio em função das combinações das madeiras substrato-cavilha e da rotação. Verifica-se um aumento linear da força em função do deslocamento, até atingir seu valor máximo. Após, a força reduz progressivamente ao longo do deslocamento.

Figura 2. Influência das combinações das madeiras substrato-cavilha e da rotação nas curvas força × deslocamento da travessa da máquina de ensaio (a) Grupo A; (b) Grupo B; (c) Grupo C; (d) Grupo D



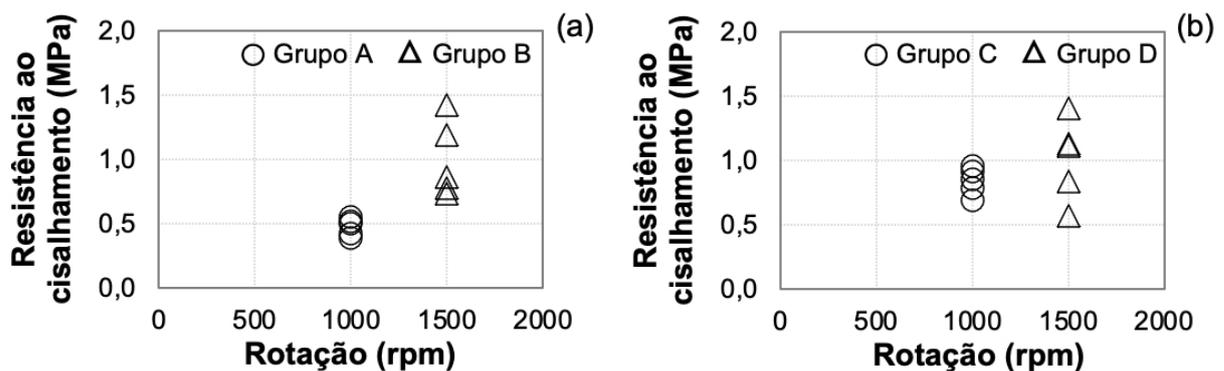
Fonte: (Autor)

Para os grupos A e C, cujas cavilhas foram soldadas a 1000 rpm, as curvas força \times deslocamento da travessa atingem valores de força máxima similares para os corpos de prova da mesma amostra. Para o Grupo A, os valores de força máxima de ruptura variam de 0,2 kN a 0,4 kN, enquanto, para o Grupo C, de 0,4 kN a 0,6 kN. Isso indica que a rotação de 1000 rpm resultou em um comportamento relativamente homogêneo no desempenho mecânico das ligações soldadas.

Para os grupos B e D, cujas cavilhas foram soldadas a 1500 rpm, as curvas força \times deslocamento da travessa apresentam maior variação entre os valores de força máxima de ruptura para os corpos de prova da mesma amostra. Para o Grupo B, os valores variam de 0,4 kN a 0,9 kN, enquanto, para o Grupo D, de 0,3 kN a 0,9 kN. Isso indica que a rotação de 1500 rpm resultou em um comportamento mais heterogêneo no desempenho mecânico das ligações soldadas. No entanto, observa-se que, de modo geral, os corpos de prova soldados a 1500 rpm, para as combinações eucalipto-itaúba e itaúba-itaúba (grupos B e D), apresentam os maiores valores de força máxima de ruptura, 0,84 kN, 0,68 kN e 0,67 kN. Isso sugere que a rotação de 1500 rpm tem potencial para proporcionar uma melhor ligação entre a cavilha e o substrato, provavelmente, devido ao calor gerado na interface de soldagem, que ocasiona uma fusão mais adequada dos polímeros da madeira nessa região.

A Figura 3 ilustra a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova, cujas cavilhas foram soldadas a 1000 rpm e 1500 rpm, em função das combinações das madeiras substrato-cavilha. O teste não paramétrico de Conover (Conover, 1999) revelou que existem diferenças estatisticamente significativas entre as medianas dos grupos A e B, A e C e A e D. Isso denota que os parâmetros de soldagem influenciam na resistência ao cisalhamento da ligação.

Figura 3. Resistência ao cisalhamento das ligações soldadas em função da rotação (a) eucalipto-itaúba; (b) itaúba-itaúba



Fonte: (Autor)

Na Tabela 2, são apresentadas as resistências ao cisalhamento médias dos grupos A a D. Para a combinação eucalipto-itaúba, o melhor resultado, de 1,00 MPa, é obtido para 1500 rpm (Grupo B). Para a combinação itaúba-itaúba, o melhor resultado, de 0,93 MPa, é obtido para 1000 rpm ou 1500 rpm (grupos C e D).

Tabela 2. Resistência ao cisalhamento média dos corpos de prova dos grupos A a D

Grupo	A	B	C	D
Madeiras substrato-cavilha	eucalipto-itaúba		itaúba-itaúba	
Rotação (rpm)	1000	1500	1000	1500
Resistência ao cisalhamento média (MPa)	0,48	1,00	0,84	1,01
Coefficiente de variação (%)	14	30	13	32

Os valores de resistência ao cisalhamento média desta pesquisa são inferiores aos relatados por Viana *et al.* (2022) ao realizarem o processo de soldagem dos corpos de prova com a combinação pinus-itaúba, avanço de 400 mm·min⁻¹ e rotações de 1000 rpm (1,58 MPa) e 1500 rpm (1,67 MPa). O pinus possui maiores porosidade e permeabilidade que o eucalipto (Viana, 2023). Isso, provavelmente, facilita a impregnação do material fundido nos poros e nas paredes

celulares localizadas na superfície do substrato (Viana, 2023).

O aumento da rotação da cavilha de 1000 rpm para 1500 rpm ocasiona um acréscimo na resistência ao cisalhamento média das ligações. Para a combinação eucalipto-itaúba, o impacto no acréscimo da resistência é mais expressivo (52%) em relação às resistências das ligações itaúba-itaúba (17%). Os resultados obtidos por Viana *et al.* (2022) também indicaram um acréscimo na resistência média (5%) ao soldarem a combinação pinus-itaúba. Nota-se que o aumento da rotação também ocasiona um acréscimo do coeficiente de variação (Tabela 2). Portanto, mais estudos devem ser realizados a fim de verificar o motivo desse comportamento.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que:

- para corpos de prova da mesma amostra, a rotação de 1000 rpm resultou em um comportamento mais homogêneo da curva força × deslocamento da travessa;
- para a combinação eucalipto-itaúba, os melhores resultados de resistência ao cisalhamento (1,00 MPa) foram obtidos para 1500 rpm;
- para a combinação itaúba-itaúba, os melhores resultados de resistência ao cisalhamento (0,93 MPa) foram obtidos para 1000 rpm ou 1500 rpm.

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 de Financiamento 001).

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). Estudo Setorial 2019. Disponível em: <https://abimci.com.br/wp-content/uploads/2022/09/Estudo-Setorial-2019.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2024.

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.

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.

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.

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.; PERES, L. G. C.; MORAES, P. D. *et al.* Influência da rotação da cavilha na resistência da superfície soldada de ligações pinus-itaúba. *In*: VICBCTEM, 2022, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: VICBCTEM, 2022.