

Soldagem rotacional com madeira de espécies nativas brasileiras

Eduardo Schneid¹, Adriel do Vale Barbosa¹, Lucas Dias Alves¹

¹ Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Campus Universitário de Sinop, ICAA, Mato Grosso, Brasil.

Original Article

*Corresponding author:
eduardo.schneid@ufmt.com

Keywords:
SRF

Wood welding

Hymenaea courbaril L.

Trattinnickia burserifolia
Mart.

Palavras-chave:
SFR

Soldagem da madeira

Hymenaea courbaril L.

Trattinnickia burserifolia
Mart.

Received in
2024/04/09

Accepted on
2024/12/12

Published in
2025/03/31

DOI:
<http://dx.doi.org/10.34062/4vyawc16>



RESUMO: A união de peças de madeira por meio da técnica da soldagem da madeira por fricção rotativa com cavilhas é considerada sustentável e torna-se uma alternativa para a indústria madeireira e pesquisas acadêmicas. Portanto, o objetivo da pesquisa foi comparar as resistências ao cisalhamento das ligações soldadas e coladas a partir da interação de duas espécies nativas brasileiras: *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) e *Trattinnickia burserifolia* Mart. (amescla). Foram utilizados 10 corpos de prova divididos em dois grupos: cinco fabricados com cavilhas soldadas por meio do processo de soldagem por fricção rotacional e cinco fabricados com cavilhas coladas. As cavilhas são de madeira de jatobá e as peças de madeira de amescla. Após a soldagem e colagem das cavilhas determinou-se a resistência ao cisalhamento das ligações por meio de testes mecânicos. Nas peças com cavilhas soldadas determinou-se a conicidade das cavilhas após os testes mecânicos. Observa-se que nas ligações com cavilhas coladas a resistência média ao cisalhamento foi de 4,878 MPa enquanto a resistência média nas ligações com cavilhas soldadas foi de 1,718 MPa. A conicidade média das cavilhas foi de 6,20%. Na região soldada a cavilha apresenta uma coloração escura em decorrência do aumento da temperatura na interface peça/cavilha durante o processo de soldagem. Conclui-se que ocorreu a soldagem entre as peças e cavilhas, demonstrando que a técnica de soldagem com madeira de espécies nativas apresenta potencial de utilização para unir peças de madeira.

Wood welding rotational of Brazilian native species

ABSTRACT: Joining wood using wood dowel rotation welding is considered eco-friendly and becoming an alternative for the timber industry and academic research. This research aims to compare the shear strength of welded dowel joints and glued dowel joints using two native Brazilian species: *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) and *Trattinnickia burserifolia* Mart. (amescla). Ten specimens were divided into two groups: five with welded dowels and five with glued dowels. The dowels were made of jatobá wood, and the pieces were made of amescla wood. After welding and gluing the dowels, the shear strength of the joints was determined by mechanical tests. In the specimens with welded dowels the taper rate of the dowels was measured after mechanical tests. The results showed that the mean shear strength of the glued dowel joints was 4.878 MPa, while the mean shear strength of the welded dowel joints was 1.718 MPa. The mean taper rate of the dowels was 6.20%. The welded region of the dowel had a dark color due to the increase in temperature at the piece/dowel interface during the welding process. It was concluded that welding occurred between the pieces and dowels, demonstrating the potential of the technique using native wood species.

Introdução

Os adesivos químicos são comumente utilizados para unir peças de madeira e principalmente para fabricar produtos de madeira engenheirada. Contudo, os métodos de união de peças de madeira sem uso de adesivos, torna-os mais sustentáveis e ganham cada vez mais destaque na indústria madeireira e em pesquisas acadêmicas (Gedara *et al.*, 2021). Sob o ponto de vista de eficiência ambiental e energética, a utilização de adesivos para unir peças de madeira não é a melhor solução, pois o processo de fabricação de adesivos consome mais energia e emitem mais dióxido de carbono comparado ao processamento da madeira, além de emitirem orgânicos voláteis (Hemmil *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2024).

Diante disso, a união de peças de madeira sem a utilização de adesivos para fabricar produtos de madeira engenheirada é factível e apresentam bons resultados. A união pode ser realizada por meio de cavilhas de madeira, a qual pode ser chamada de “Brettstapel” (Sotayo *et al.*, 2020). Baseado nesse conceito de união, produtos podem ser encontrados na indústria, como por exemplo o “dowellam” da StructureCraft, e pesquisas têm sido desenvolvidas com foco em produtos de madeira engenheirada utilizando-se cavilhas para substituir os adesivos (Sotayo *et al.*, 2020, Pereira *et al.*, 2021, Mehra *et al.*, 2021, Ren *et al.*, 2024; Vilguts *et al.*, 2024).

Dentre as formas utilizadas para inserir cavilhas a fim de unir peças de madeira, pode-se citar o uso da técnica de soldagem da madeira por fricção rotacional (Sochacki, 2014). Essa técnica basicamente consiste em inserir uma cavilha de madeira em alta rotação em um furo em peças de madeira. Um dos parâmetros essenciais para ocorrer a soldagem é o diâmetro da cavilha ser maior que o diâmetro do furo na peça, a fim de provocar um atrito entre as superfícies, elevando-se a temperatura e ocasionando o derretimento da lignina (Ganne-Chédeville *et al.*, 2005). Essa técnica resulta em valores de resistência de ligação comparáveis ou até superiores a união de peças de madeira utilizando cavilhas e adesivos sintéticos (Rodriguez *et al.*, 2010, Pizzi *et al.*, 2004).

A qualidade da soldagem da madeira por meio da técnica de fricção rotacional relaciona-se aos parâmetros de processo, dentre eles destacam-se: relação entre o diâmetro da cavilha e do furo na peça, velocidade de avanço da cavilha e a rotação da cavilha (Pizzi *et al.* 2004; Kanazawa *et al.* 2005). Os melhores resultados são obtidos quando a relação entre o diâmetro da cavilha e do furo é de 1,25, a velocidade de avanço está entre 500 mm/min e 750 mm/min e a velocidade de rotação da cavilha entre 1000 rpm e 1750 rpm (Pizzi *et al.* 2006; Župcič *et al.* 2008; Belleville *et al.* 2013).

O domínio do processo de soldagem da madeira com espécies nativas brasileiras pode auxiliar a indústria de base florestal no uso de novas

tecnologias de união de componentes de madeira. No Brasil, a técnica de soldagem da madeira é incipiente, sendo encontrado poucos trabalhos e que utilizam espécies nativas brasileiras (Carrasco e Maciente 2008; Schneid e Moraes 2016; Viana *et al.* 2021; Viana *et al.* 2022, Viana, 2023).

Portanto, o objetivo da pesquisa foi comparar as resistências ao cisalhamento das ligações soldadas e coladas a partir da interação de duas espécies nativas brasileiras: *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) e *Trattinnickia burserifolia* Mart. (amescla).

Material e métodos

Corpos de prova e amostra

Na pesquisa foram utilizados 10 corpos de prova divididos em dois grupos: cinco fabricados com cavilhas soldadas e outros cinco fabricados com cavilhas coladas. Nos dois grupos, as cavilhas são de madeira da espécie *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) e as peças de madeira da espécie *Trattinnickia burserifolia* Mart. (amescla).

Nos corpos de prova fabricados com cavilhas soldadas, as mesmas foram unidas nas peças de madeira pelo processo de soldagem. Já nos corpos de prova fabricados com cavilhas coladas, elas foram unidas nas peças de madeira por colagem com adesivo PVA.

As cavilhas possuíam diâmetro de 10 mm e comprimento de 100 mm. As peças de madeira (Figura 1) possuíam dimensões quadradas de 60 x 60 mm e espessura de 20 mm. Contudo, nas peças onde as cavilhas foram soldadas, o diâmetro do furo no centro da peça foi de 8 mm e nas peças com cavilhas coladas 10 mm. Logo, a relação entre o diâmetro da cavilha soldada e do diâmetro do furo foi igual a 1,25. Essa relação foi adotada, pois apresentam melhores resultados de resistência ao cisalhamento da ligação de acordo a literatura (Pizzi *et al.* 2004; Ganne-Chédeville *et al.* 2005; Achet *et al.* 2010; Schneid e Moraes 2016; Zhu *et al.* 2018).

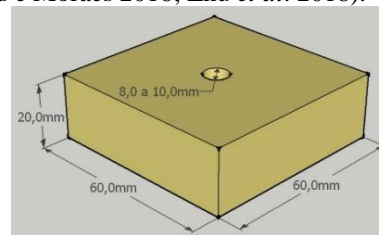


Figura 1. Peças de madeira para soldar ou colar as cavilhas de madeira.

Densidade aparente a 12% de teor de umidade

As densidades aparentes das peças de madeira e das cavilhas foram determinadas antes da soldagem e colagem das cavilhas nas peças de madeira. As cavilhas e peças foram mantidos em ambiente climatizado com umidade relativa do ar igual 65% e temperatura de 21 °C, a fim de obter o teor de umidade de equilíbrio da madeira igual 12%. O teor de umidade de equilíbrio foi constatado após

a verificação de massa constante das peças e cavilhas após sucessivas pesagens em balança analítica. Posteriormente, as dimensões das peças de madeira e das cavilhas foram medidas com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm e as massas obtidas em balança analítica com precisão de 0,01 g. A densidade foi calculada conforme Equação 1.

$$\rho_{12\%} = \frac{m}{v} \quad (1)$$

ρ_{ap} é a densidade aparente (g/cm^3), m a massa (g) e v é o volume (cm^3).

Soldagem rotacional por fricção

O processo de soldagem rotacional por fricção consistiu em inserir uma cavilha de madeira enquanto a mesma é rotacionada por meio da furadeira (Figura 2). A peça de madeira foi fixada na base da furadeira em uma morsa e a cavilha inserida no mandril. Após, o motor da furadeira foi acionado na velocidade de rotação estabelecida e iniciado o movimento vertical da cavilha em rotação, inserindo a mesma no furo da peça. O tempo de movimento vertical da cavilha foi de aproximadamente 2 segundos, proporcionando velocidade de avanço da cavilha igual a 600 mm.min^{-1} . Já velocidade de rotação da cavilha foi de 1110 rpm.

Após, o motor da furadeira foi imediatamente desligado e a cavilha retirada do mandril da furadeira.

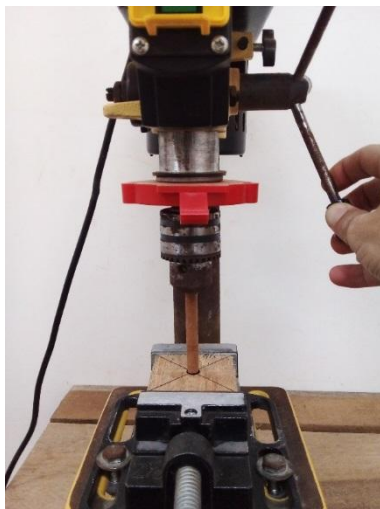


Figura 2. Processo de soldagem da cavilha.

Colagem das cavilhas

O processo de colagem consistiu na aplicação do adesivo do tipo PVA na superfície da cavilha que seria inserida na peça de madeira. A cavilha foi inserida 20 mm na peça e possuía diâmetro de 10 mm. Logo foi possível calcular a área de aplicação do adesivo, a qual foi igual a $628,32 \text{ mm}^2$. A gramatura de adesivo utilizada foi de 200 g/m^2 .

Após a aplicação do adesivo na superfície

da cavilha, a mesma foi inserida no furo da peça e a cura do adesivo foi de 24 horas. Como o diâmetro da cavilha e do furo são iguais, não foi necessário aplicar pressão para a inserção da cavilha.

Resistência ao cisalhamento da ligação

O teste mecânico para avaliar a resistência ao cisalhamento da ligação soldada e colada entre as cavilhas e peças de madeira consistiu em aplicar uma força de tração paralelo ao eixo da cavilha até a ruptura da superfície de solda ou cola entre a cavilha e a peça de madeira (Figura 3). A força foi aplicada pelo deslocamento da travessa da máquina universal de ensaios. A superfície cisalhada corresponde à área de contato entre a cavilha e peça de madeira.

A velocidade de deslocamento da travessa da máquina de ensaios foi de $2,0 \text{ mm/min}$ no sentido de tração. Os valores de força e deslocamento foram registrados por um sistema de aquisição de dados da máquina de ensaios. A partir desses valores foram obtidos os gráficos de força×descolamento, utilizados para determinar a força máxima da ligação.

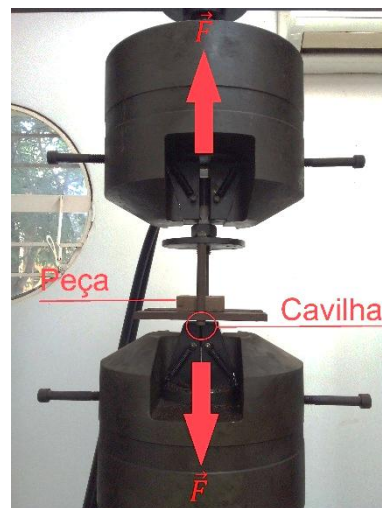


Figura 3. Teste mecânico para determinar a resistência ao cisalhamento da ligação.

A resistência ao cisalhamento da ligação foi expressa pela tensão de cisalhamento na superfície de soldagem da madeira no momento da ruptura e calculada conforme a equação (2).

$$f_v = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot d \cdot e_{pe\acute{c}a}} \quad (2)$$

f_v é a resistência ao cisalhamento (MPa), $F_{m\acute{a}x}$ a força máxima (N), d é o diâmetro do furo (mm) e $e_{pe\acute{c}a}$ é a espessura da peça (mm).

Conicidade da cavilha soldada

A conicidade da cavilha soldada foi obtida a partir dos valores dos diâmetros máximo e mínimo

mensurados com auxílio de um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm e calculada conforme Equação 3. Esses diâmetros foram mensurados apenas na região onde ocorreram as soldas e após os testes mecânicos, pois as cavilhas já não se encontravam mais fixadas na peça de madeira, possibilitando a observação da região soldada.

$$c = \frac{D-d}{L} \times 100 \quad (3)$$

c é a conicidade (%), D é o diâmetro maior (mm), d é o diâmetro menor (mm) e L é a espessura da peça (mm).

Análise estatística

As médias da densidade das cavilhas, densidade das peças, força máxima e resistência ao

cisalhamento da ligação foram comparadas entre os tratamentos por meio do teste ANOVA com 5% de probabilidade de erro (Montgomery e Runger 2003).

Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios e desvios padrão das densidades aparentes da madeira das peças e das cavilhas, força máxima e resistências ao cisalhamento das ligações coladas e soldadas (f_v) obtidos nos testes mecânicos. Já na Figura 4 são apresentados os gráficos de força×descolamento obtidos nos testes mecânicos realizados com as ligações com cavilhas coladas e soldadas.

Tabela 1. Valores de densidades e propriedades mecânicas das ligações soldadas e coladas.

Trat.	$\rho_{peça}$ (g/cm ³)	ρ_{cav} (g/cm ³)	Resistência ao cisalhamento				Nível de Confiança (%)
			$F_{máx,m}$ (kN)	$f_{v,m}$ (MPa)	f_{min} (MPa)	$f_{máx}$ (MPa)	
Colada	0,496a (0,033)	0,792a (0,028)	2,9416a (1,606)	4,878a (0,300)	4,56	5,35	99
Soldada	0,498a (0,018)	0,796a (0,024)	0,8274b (0,1993)	1,718b (0,445)	1,18	2,31	62

Em que: $\rho_{peça}$ é a densidade aparente a 12%, ρ_{cav} é a densidade aparente a 12% da cavilha, $F_{máx,m}$ é a média da força máxima, $f_{v,m}$ é a resistência ao cisalhamento média das ligações, f_{min} é a resistência ao cisalhamento mínima das ligações, $f_{máx}$ é a resistência ao cisalhamento máxima das ligações. O nível de confiança refere-se aos valores de resistência ao cisalhamento média das ligações ($f_{v,m}$). Letras diferentes na mesma coluna demonstram diferença estatística. Valores entre parênteses são os desvios padrões.

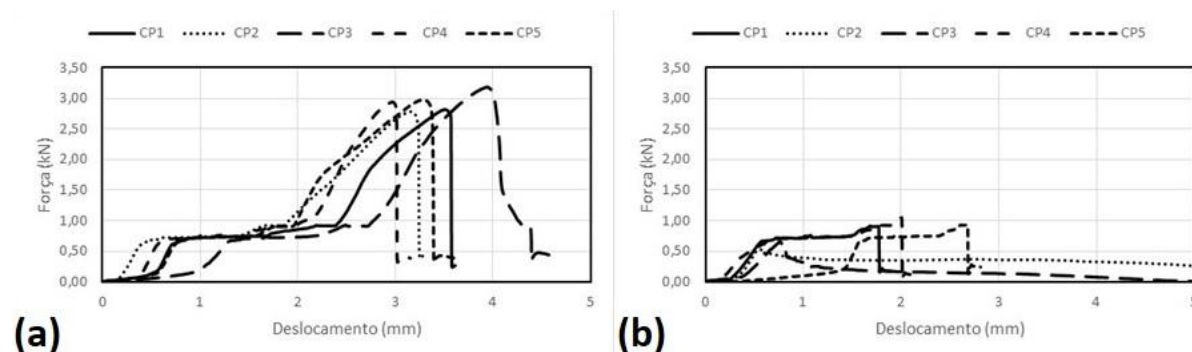


Figura 4. Curvas de força×deslocamento obtidos nos testes de resistência ao cisalhamento: (a) ligações com cavilhas coladas e (b) ligações com cavilhas soldadas.

A partir da comparação das médias dos valores das densidades das peças entre os tratamentos, observa-se por meio do teste de ANOVA que as médias não apresentaram diferença estatística significativa, assim como ocorreu na comparação das médias das densidades das cavilhas. Logo, é possível inferir que a densidade das peças e das cavilhas não influenciaram os valores de resistência ao cisalhamento da ligação.

Quanto as propriedades mecânicas, observa-se na Tabela 1 que as ligações com cavilhas coladas apresentaram maior resistência média ao

cisalhamento quando comparados aos valores médios obtidos nas ligações com cavilhas soldadas. Logo, as médias das resistências ao cisalhamento apresentaram diferença estatística significativa entre os tratamentos. O valor máximo de resistência ao cisalhamento das ligações soldadas é de 2,310 MPa e a diferença entre os valores máximo e mínimo igual a 49%. Viana *et al.* (2021) utilizaram relação entre o diâmetro da cavilha e do furo de 1,25 e peças de madeira de *Pinus taeda* (0,606 g/cm³) e cavilhas de *Mezilaurus itauba* (0,824 g/cm³) e obtiveram a resistência média ao cisalhamento da ligação igual a

2,408 MPa, com o máximo valor de 3,10 MPa e diferença entre os valores máximo e mínimo de 40%. Belleville *et al.* (2016) utilizaram madeira de *Tectona grandis* (0,598 g/cm³) e obtiveram resistência ao cisalhamento média igual a 1,9 MPa e, portanto, valores de resistência mais próximo ao encontrado no presente estudo. Pizzi *et al.* (2004) compararam os resultados de cavilhas soldadas e coladas com PVAc e relatam que a resistência máxima de cisalhamento na ligação entre os métodos são semelhantes, encontrando valores de resistência máxima para ligações com cavilhas soldadas igual a 4,97 MPa e para ligações com cavilhas coladas igual 4,22 MPa. Rodriguez *et al.* (2010) concluíram que a resistência das ligações com cavilhas soldadas e coladas com PVAc são semelhantes para espécie *Betula alleghaniensis*, enquanto que para a espécie *Acer saccharum* a resistência da ligação soldada foi superior a resistência da ligação colada com PVAc.

A madeira de amescla, utilizada na presente pesquisa, possui permeabilidade moderada apenas no alburno (IPT, 2024). Tal característica pode ter contribuído para que os valores das resistências ao cisalhamento das ligações soldadas tenham sido afetados pela baixa porosidade da madeira de amescla, pois a impregnação do material fundido nos poros e nas paredes celulares localizadas na interface cavilha/peça é maior em madeiras com maior porosidade e permeabilidade (Böröcsök; Pásztor, 2021). Viana (2023) a partir da pesquisa de soldagem por fricção rotacional utilizando madeira de pinus (*Pinus taeda*), eucalipto (*Eucalyptus saligna/Eucalyptus alba*) e itaúba (*Mezilaurus itauba*); com parâmetros de relação do diâmetro da cavilha e do furo de 1,25, rotação da cavilha de 1000 rpm e avanço de 500 mm.min⁻¹, encontrou valores de resistência média de cisalhamento da ligação 3,30 MPa para a combinação entre pinus e eucalipto, 0,79 MPa para pinus e itaúba e 0,48 MPa para eucalipto e itaúba. A autora relatou que o melhor resultado foi quando utilizado cavilha de eucalipto e peça de pinus, inferindo que esse resultado pode ser consequência da alta porosidade e permeabilidade do pinus e do entrelaçamento das fibras do eucalipto na interface de soldagem.

Na Tabela 1 observa-se também o nível de confiança dos valores das resistências ao cisalhamento médias para as ligações. Nas ligações com cavilha colada e cavilhas soldadas, os níveis de confiança foram de 99% e 62%, respectivamente. É recomendado que o nível de confiança de uma amostra seja superior a 90%, contudo para as ligações com cavilhas soldadas isso não foi obtido. Desta maneira, para obter o nível de confiança de 90% seria necessário utilizar 25 corpos de prova com cavilhas soldadas.

Na Figura 4a observam-se as curvas de força×deslocamento para os corpos de prova com cavilhas coladas. Todas as curvas apresentaram aumento inicial da força em função do deslocamento

até atingir um patamar plástico. Após, a força aumenta linearmente com o deslocamento até atingir o valor máximo e em seguida a força diminui de maneira abrupta, característica de um rompimento frágil da ligação. Já as curvas de força×deslocamento para os corpos de prova com cavilhas soldadas (Figura 4b), a força aumenta em função do deslocamento até atingir um patamar plástico e em seguida ocorre uma diminuição abrupta, caracterizando o rompimento da ligação. Esse comportamento ocorreu em 3 dos 5 corpos de prova. Nos demais corpos de prova a força aumentou com o deslocamento, atingiu o valor máximo e decresceu progressivamente em função do deslocamento.

O valor médio de conicidade das cavilhas após a soldagem é igual a 6,20% e com desvio padrão de 1,42. Observa-se na Figura 5 que as cavilhas assumem um formato cônico ao longo do comprimento da região soldada. Esse resultado decorre da pressão de contato e aumento da temperatura na região soldada, pois durante o processo de soldagem, a extremidade da cavilha que é inserida primeiro tem seu diâmetro gradativamente reduzido e o diâmetro do furo na peça tem o diâmetro aumentado na outra extremidade (Pizzi *et al.* 2004, Viana *et al.* 2021). Viana (2023) encontrou valores médios de conicidade de 3,66% para madeiras de pinus e eucalipto, 3,59% para madeiras de pinus e itaúba e 4,22% para madeira de eucalipto e itaúba no processo de soldagem por fricção rotacional com parâmetros semelhantes da presente pesquisa.

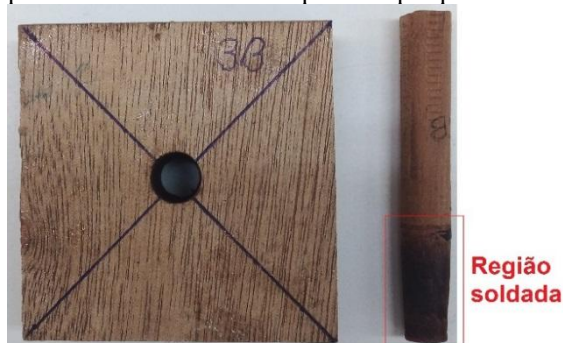


Figura 5. Peça e cavilha após os testes mecânicos de resistência ao cisalhamento.

Na Figura 5 observa-se que na região soldada a cavilha apresenta uma coloração escura em decorrência do aumento da temperatura na interface peça/cavilha durante o processo de soldagem (Pizzi *et al.* 2004). O aumento da temperatura se faz necessário para que ocorra a fusão entre a lignina e hemicelulose da madeira na interface de soldagem e a temperatura pode variar entre 180 °C e 355 °C quando utilizado o processo de fricção rotacional (Mansouri *et al.*, 2009; Rodriguez *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2021). Essa variação de temperatura na interface é decorrente da variação entre espécies utilizadas no processo de soldagem (Rodriguez *et al.*, 2010).

Portanto, analisando-se os valores de

resistência ao cisalhamento das ligações soldadas (Tabela 1) e o escurecimento da região soldada (Figura 5), é possível inferir que a soldagem ocorreu de forma satisfatória utilizando-se madeira de amescla e cavilhas de jatobá.

Conclusões

A resistência ao cisalhamento das ligações com cavilhas coladas foi superior a resistência ao cisalhamento das ligações com cavilhas soldadas. Porém, observou-se que ocorreu a soldagem na interface entre as peças e cavilhas, fato que pode ser verificado pela coloração escura da cavilha na região de atrito.

Logo a soldagem rotacional por fricção utilizando madeira de espécies nativas apresenta potencial. Contudo recomenda-se que sejam realizados testes com maior interação entre espécies nativas brasileiras.

Referências bibliográficas

Belleville B, Ozarska B, Pizzi A (2016) Assessing the potential of wood welding for Australian eucalypts and tropical species. *European Journal of Wood Products*, 74: 753- 757. doi: 10.1007/s00107-016-1067-5

Belleville B, Stevanovic T, Pizzi A, Cloutier A, Blanchet P (2013) Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(5-6): 566-576. doi: 10.1080/01694243.2012.687596

Börcsök Z.; Pásztor Z. (2021) The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79: 511-526. doi: 10.1007/s00107-020 01637-3

Carrasco EVM, Maciente HS (2008) Contribuição à técnica da soldagem de peças de madeira. *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*, 23(9):30-41. ISSN 1806-6097.

Ganne-Chedeville C, Pizzi A, Thomas A, Leban JM, Bocquet JF, Despres A, Mansouri H (2005) Parameter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19: 1157-1174. doi: 10.1163/156856105774429037

Hemmil V., Adamopoulos S., Karlsson O., Kumar, A (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – An review. *RSC Adv.*, 7, 38604–38630, 2017. doi: 10.1039/c7ra06598a

Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Informações sobre madeiras. Disponível em: https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca. Acesso em: 20 mar. 2024.

Kanazawa F, Pizzi A, Properzi M, Delmotte L,

Pichelin F (2005) Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(12): 1025-1038. doi: 10.1163/156856105774382444

Li, S, Zhang H, Shu B, Cheng L, Ju Z, Lu X (2021) Study on the bonding performance of the Moso bamboo dowel welded to a poplar substrate joint by high-speed rotation. *Journal of Renewable Materials*, 9(7): 1225-1237. doi: 10.32604/jrm.2021.014364

Mansouri HR, Leban JM, Pizzi A (2010) End-grain butt joints obtained by friction welding of high density eucalyptus wood, *Wood Sci.Technol.*, 44(3): 399-406. Doi: 10.1007/s00226-010-0349-z

Mansouri HR, Omrani P, Pizzi A (2009) Improving the water resistance of linear vibration welded wood joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23: 63-70. doi: 10.1163/156856108X335595

Mansouri HR, Omrani P, Pizzi A (2009) Improving the water resistance of linear vibration-welded wood joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23: 63-70. doi: 10.1163/156856108X335595

Mehra, S.; O’Ceallaigh, C.; Sotayo, A.; Guan, Z.; Harte, A.M. (2021) Experimental Characterisation of the Moment-Rotation Behaviour of Beam-Beam Connections Using Compressed Wood Connectors. *Eng. Struct.*, 247(113132):1-9, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113132>

Montgomery DC, Runger GC (2003) Applied statistics and probability for engineers. Wiley: New York, 2003.

Pizzi A, Despres A, Mansouri HR, Leban JM, Rigolet S (2006) Wood joints by through-dowel rotation welding- microstructure, 13C-NMR and water resistance. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(5): 427-436. doi: 10.1163/156856106777144327

Pizzi A, Leban JM, Kanazawa F, Properzi M, Pichelin F (2004) Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(11):1263-1278. doi: 10.1163/1568561041588192

Pizzi A, Leban JM, Kanazawa F, Properzi M, Pichelin F (2004) Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(11): 1263-1278. doi: 10.1163/1568561041588192

Ren, H.; Bahrami, A.; Cehlin, M.; Wallhagen, M. (2024) Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Panels with Environmentally Friendly Timber Edge Connections. *Buildings*, 14(1455):1-25, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings14051455>

Rodriguez G, Diouf P, Blanchet P, Stevanovic T

(2010) Wood-dowel bonding by high-speed rotation welding-Application to two Canadian hardwood species. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24: 1423-1436, 2010. doi: 10.1163/016942410X501025

Schneid E, Moraes PD (2016) União de peças de madeira por meio da técnica de soldagem por fricção rotacional. In: *XV EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, Curitiba, Brasil.

Sochacki, B. (2014) *Brettstapel panels: in-plane strength and stiffness*. Dissertação (Mestrado), Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath. 45p.

Sotayo, A.; Bradley, D.; Bather, M.; Sareh, P.; Oudjene, M.; El-Houjeiri, I.; Harte, A.M.; Mehra, S.; O’Ceallaigh, C.; Haller, P.; et al. (2020). Review of State of the Art of Dowel Laminated Timber Members and Densified Wood Materials as Sustainable Engineered Wood Products for Construction and Building Applications. *Developments in the Built Environment*, 1(100004):1-11, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>

Sotayo, A.; Bradley, D.F.; Bather, M.; Oudjene, M.; El-Houjeiri, I.; Guan, Z. (2020) Development and Structural Behaviour of Adhesive Free Laminated Timber Beams and Cross Laminated Panels. *Constr. Build. Mater.*, 259(119821):1-10, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119821>

Structure Craft. Dowel Laminated Timber—The All Wood Panel—Mass Timber Design Guide. Disponível em: <https://structurecraft.com/materials/mass-timber/dlt-dowel-laminated-timber>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2025.

Viana ACC, Ebersbach FG, Moraes PD, Weingaertner WL (2022) Influence of pre-drilling hole and feed rate on welded surface strength of pine-itauba joints. *Case Studies in Construction Materials*, 17: 1-13. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01473

Viana ACC, Moraes PD, Weingaertner WL, Zaniboni PAN, Prando T (2021) Soldagem de cavilhas de itaúba em substratos de pinus por fricção rotacional. In: *XVII EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, Florianópolis, Brasil.

Viana, ACC (2023) *Soldagem das madeiras de pinus, eucalipto e itaúba por fricção rotativa*. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina. 160p.

Vilguts, A.; Phillips, A.R.; Jerves, R.; Antonopoulos, C.; Griechen, D. (2024) Monotonic Testing of Single Shear-Plane CLT-to-CLT Joint with Hardwood Dowels. *J. Build. Eng.*, 88(109252):

1-13, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109252>

Zhu X, Xue Y, Zhang S, Zhang J, Shen J, Yi S, Gao Y (2018) Mechanics and crystallinity/thermogravimetric investigation into the influence of the welding time and CuCl₂ on wood dowel welding. *BioResources*, 13(1): 1329-1347. doi: 10.15376/biores.13.1.1329-1347

Župčić I, Mihulja G, Bogner A, Grbac I, Hrovat B (2008) Welding of solid wood. *Drvna Industrija*, 59(3): 113-119, 2008.