

Soldagem das madeiras de pinus e de itaúba por fricção rotativa

Ana Carolina Costa Viana ^[1], Poliana Dias de Moraes ^[2],
Walter Lindolfo Weingaertner ^[3], Pedro Antonio Neves Zaniboni ^[4], Thaison Prando ^[5]

[1] anacaroliana@outlook.com. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC/Departamento de Engenharia Civil.

[2] poliana.moraes@ufsc.br. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC/Departamento de Engenharia Civil.

[3] wlw1951@gmail.com. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC/Departamento de Engenharia Mecânica.

[4] pedroanzaniboni@gmail.com. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC/Departamento de Engenharia Civil.

[5] thprando@hotmail.com. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC/Departamento de Engenharia Mecânica.

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas as características e a resistência ao cisalhamento das interfaces soldadas por fricção rotativa (SFR) de cavilhas de madeira de itaúba em substratos de madeira de pinus. Os corpos de prova são compostos por cavilhas de itaúba e substratos de pinus, nos quais foram usinados pré-furos usando duas relações de diâmetro cavilha/pré-furo: 1,25 e 1,11. Após a SFR, as uniões soldadas foram submetidas a ensaios mecânicos de extração das cavilhas, a fim de se determinar a tensão de cisalhamento na ruptura. A macro e a microestrutura da interface soldada foram avaliadas visualmente e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostram que: a tensão de cisalhamento média na ruptura, para as relações diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25 e 1,11, são de 2,41 e 1,77 MPa, respectivamente, indicando que, para as madeiras estudadas, a relação diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25 apresenta ligações soldadas mais resistentes; a SFR ocasiona o escurecimento da interface de soldagem; o pré-furo e a cavilha, originalmente cilíndricos, assumem um formato cônico, durante o processo de SFR; a interface entre as madeiras de pinus e de itaúba é homogênea e bem soldada.

Palavras-chave: *Pinus taeda*. *Mezilaurus itauba*. Soldagem da madeira. Soldagem por fricção rotativa.

ABSTRACT

In this research, the characteristics and the shear strength of the welded interfaces obtained by rotary friction welding (RFW) of itauba wood dowels in pine wood substrates are presented. The specimens are composed of itauba dowels and pine substrates, in which pre-holes were machined using two dowel/pre-hole diameter ratios: 1.25 and 1.11. After the RFW, the welded joints were subjected to mechanical tests to extract the dowels, in order to determine the shear stress at the rupture. The macro and microstructure of the welded interface were evaluated visually and by scanning electron microscopy (SEM). The results show that: the average shear stresses at the rupture for 1.25 and 1.11 dowel/pre-hole diameter ratios are 2.41 and 1.77 MPa, respectively, indicating that, for the woods studied here, the 1.25 dowel/pre-hole diameter ratio shows welded joints with greater strength; the RFW causes the darkening of the welding interface; the pre-hole and the dowel, originally cylindrical, assume a conical shape, during the RFW process; the interface between pine and itauba woods is homogeneous and well welded.

Keywords: *Pinus taeda*. *Mezilaurus itauba*. Wood welding. Rotary friction welding.

1 Introdução

A soldagem por fricção rotativa (SFR) da madeira consiste em produzir ligações sólidas, unindo elementos por meio do calor gerado pelo atrito presente no movimento relativo entre a superfície da cavilha e a parede do furo. Trata-se de um método simples e rápido que dispensa o uso de adesivos, pregos ou parafusos e que produz, em poucos segundos, calor capaz de derreter a interface das madeiras em contato, formando posteriormente a ligação (LEBAN *et al.*, 2005).

A soldagem por fricção rotativa (SFR) consiste em unir peças de madeiras mediante a inserção de cavilhas nos pré-furos das peças, com rotação e avanço determinados (PIZZI *et al.*, 2003; LEBAN *et al.*, 2005). A SFR apresenta potencial para aplicação na indústria madeireira e na construção civil, tanto na fabricação de móveis e similares, quanto na produção de pisos e de painéis e na ligação de elementos estruturais (BOCQUET *et al.*, 2006; BOCQUET *et al.*, 2007; BELLEVILLE *et al.*, 2011; PIZZI, 2014).

O desempenho mecânico das ligações de madeira SFR é função dos parâmetros relacionados ao processo de soldagem. Entre eles, destacam-se a diferença relativa entre os diâmetros da cavilha e do pré-furo do substrato, o diâmetro da cavilha, as velocidades angular e de avanço (PIZZI *et al.*, 2004; KANAZAWA *et al.* 2005), visto que esses parâmetros influenciam na geração de calor por atrito e, conseqüentemente, no aumento da temperatura, promovendo a fusão da lignina intercelular na interface de soldagem (PIZZI *et al.* 2004).

No Brasil, a soldagem de madeiras é recente e pouco divulgada, sendo encontrados poucos artigos referentes à soldagem de madeiras nativas e plantadas no Brasil, como aqueles publicados por Carrasco e Maciente (2008), Schneid e Moraes (2015) e Martins (2015). Esta pesquisa tem por objetivo avaliar as características das interfaces de cavilhas de madeira de itaúba soldadas por fricção rotativa (SFR), em substratos de madeira de pinus, bem como a resistência ao cisalhamento das superfícies dessas ligações e assim contribuir com o aprimoramento da técnica.

2 Referencial teórico

Nesta seção, são apresentadas informações referentes ao processo de soldagem da madeira, bem

como a influência da relação diâmetro cavilha/pré-furo no desempenho mecânico das ligações soldadas por fricção rotativa (SFR).

2.1 A soldagem da madeira por fricção

Segundo Stamm, Natterer e Navi (2005a), o processo de soldagem da madeira é subdividido em seis fases. A fase I corresponde ao início da soldagem, caracterizando-se pelo rápido aumento da temperatura. Nessa fase, a água contida na madeira evapora e a interface entre a cavilha e o substrato é alisada em virtude do movimento friccional, promovendo a redução da pressão de contato. Na fase II, a pressão de contato é constante e o aumento da temperatura é quase linear. A fase III é identificada pelo aumento contínuo da força de atrito, acompanhado por uma geração incipiente de fumaça, devido ao calor gerado. Na fase IV, a temperatura máxima é atingida na interface, resultado do equilíbrio da temperatura e da força de atrito. Na fase V, o processo é interrompido, ocasionando o resfriamento e a solidificação do material fundido na interface, caracterizando a fase VI.

A soldagem da madeira por fricção rotativa decorre, principalmente, do derretimento e do fluxo da lignina e das hemiceluloses, devidos ao aquecimento induzido durante a movimentação relativa dos elementos envolvidos (PIZZI, 2014). O processo ocasiona a completa deterioração da estrutura celular da madeira na interface, formando um material amorfo e denso, fundido com fragmentos de fibras de madeira densificadas (PIZZI, 2014). De acordo com Stamm, Natterer e Navi (2005a, 2005b), a interface unida pela soldagem compreende uma região central, composta por material amorfo e denso, e uma região mais externa, composta de fibras densificadas e não densificadas, as quais se apresentam menos deterioradas nos anéis anuais do lenho estival, uma vez que suas paredes celulares são mais espessas, ficando quase intactas.

As altas temperaturas, atingidas durante o processo de soldagem da madeira por fricção rotativa, produzem o escurecimento da interface das peças em contato. Além disso, durante a soldagem, a cavilha, originalmente cilíndrica, assume um formato cônico, em virtude do desgaste ocasionado pelo atrito entre as superfícies da cavilha e do pré-furo do substrato (PIZZI *et al.*, 2004).

2.2 Relação entre os diâmetros da cavilha e do pré-furo do substrato

O desempenho mecânico das ligações de madeira soldadas por fricção rotativa (SFR) é função da relação diâmetro cavilha/pré-furo, visto que esse parâmetro influencia significativamente na resistência da ligação (PIZZI *et al.*, 2004). Pizzi *et al.* (2004) soldaram cavilhas de madeira *Fagus sylvatica* (600–750 kg/m³), folhosa, em pré-furos usinados em substratos de madeira *Picea abies* (405–425 kg/m³), conífera. De acordo com os autores, as ligações mais resistentes são obtidas para a relação diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25, dentre as relações de 1,25, 1,11 e 1,0. Além disso, os autores relatam que maiores relações de diâmetro cavilha/pré-furo não produzem melhores resultados e que a relação 1,25 (10 mm/8 mm) seria considerada o resultado otimizado para os parâmetros de ensaio adotados por eles.

As resistências das ligações soldadas das madeiras folhosas *Acer saccharum* (632–678 kg/m³), *Betula alleghaniensis* (619–639 kg/m³), *Corymbia maculata* (965 kg/m³), *Eucalyptus pilularis* (925 kg/m³), *Eucalyptus saligna* (784 kg/m³) e *Tectona grandis* (598 kg/m³), são apresentadas na Tabela 1. As relações diâmetro cavilha/pré-furo variam entre 1,11 e 1,45. Observa-se que, as madeiras *Corymbia maculata* e *Eucalyptus pilularis*, que possuem massa específica acima de 900 kg/m³, apresentam os maiores valores de tensão de cisalhamento para a relação de 1,11. No entanto, as demais espécies, que possuem massa específica entre 598 e 784 kg/m³, apresentam os maiores valores de tensão de cisalhamento para a relação de 1,25 e 1,26.

Além das pesquisas mencionadas anteriormente, Ganne-Chedeville *et al.* (2005), Auchet *et al.* (2010), Pizzi *et al.* (2011), Schneid e Moraes (2016) e Zhu *et al.* (2018), também adotaram a relação de 1,25 para a soldagem por fricção rotativa (SFR) de madeiras coníferas e folhosas, como *Eucalyptus* spp. (794 kg/m³), *Fagus sylvatica* (630–710 kg/m³), *Pinus elliotti* (424 kg/m³), *Pinus sylvestris* (562–702 kg/m³), *Larix gmelinii* (680 kg/m³) e *Betula* spp. (557 kg/m³). Diante disso, verifica-se que, para madeiras coníferas e folhosas, de origem canadense, europeia, australiana ou plantadas no Brasil, com massas específicas entre 405 e 794 kg/m³, os melhores resultados de resistência mecânica das ligações soldadas são obtidos para a relação cavilha/pré-furo de 1,25.

Para madeiras folhosas, de origem australiana, com massas específicas acima de 900 kg/m³, os

melhores resultados de resistência mecânica das ligações soldadas são obtidos para a relação cavilha/pré-furo de 1,11. De acordo com Belleville *et al.* (2016), para madeiras de alta densidade, o processo de fusão da interface entre a cavilha e o substrato é mais lento. Portanto, o aumento do diâmetro do pré-furo facilita a inserção da cavilha, reduz o tempo de soldagem e a carbonização da interface.

Tabela 1 – Resistência de ligações soldadas por fricção rotativa (SFR)

Madeira	Relação diâmetro cavilha/pré-furo	Tensão de cisalhamento (MPa)
<i>Acer saccharum</i>	1,26	9,0 ± 1,2
	1,31	5,4 ± 1,0
	1,36	3,5 ± 1,5
<i>Betula alleghaniensis</i>	1,26	7,1 ± 1,1
	1,31	1,3 ± 0,2
	1,36	2,6 ± 1,8
<i>Corymbia maculata</i>	1,11	1,2 ± 0,6
	1,25	0,6 ± 0,2
	1,45	0,5 ± 0,1
<i>Eucalyptus pilularis</i>	1,11	2,8 ± 0,2
	1,25	1,5 ± 0,2
	1,45	1,1 ± 0,2
<i>Eucalyptus saligna</i>	1,11	2,8 ± 0,6
	1,25	3,4 ± 0,4
	1,45	2,0 ± 0,6
<i>Tectona grandis</i>	1,11	0,7 ± 0,5
	1,25	1,9 ± 0,3
	1,45	1,6 ± 0,4

Fonte: Rodriguez *et al.* (2010); Belleville *et al.* (2016).

3 Método da pesquisa

Nesta seção, são apresentados os materiais e os processos usados para a confecção dos corpos de prova, para a análise macro e microestrutural da interface soldada, para a realização dos ensaios mecânicos de extração das cavilhas, para o cálculo e análise dos resultados.

3.1 Madeiras

As madeiras usadas nesta pesquisa foram de pinus da espécie *Pinus taeda* (classe das coníferas), proveniente de florestas plantadas do estado do Paraná e de itaúba da espécie *Mezilaurus itauba* (classe das folhosas), proveniente de florestas localizadas no estado

do Mato Grosso. O pinus e a itaúba caracterizavam-se por apresentar massas específicas aparentes médias de 606 kg/m^3 e 824 kg/m^3 , respectivamente, a 12% de teor de umidade. Optou-se pelas espécies citadas devido às suas comuns aplicações na indústria moveleira e na construção civil.

3.2 Amostra e corpos de prova

A amostra foi composta por 11 corpos de prova constituídos pelo substrato de pinus e pela cavilha de itaúba. Seis corpos de prova, com dimensões de $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$, constituíram o Grupo A e cinco corpos de prova, com dimensões de $54 \text{ mm} \times 54 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$, constituíram o Grupo B, conforme especificado na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade e dimensões dos corpos de prova

Grupo	Diâmetro pré-furo (mm)	Relação diâmetro cavilha/pré-furo	Dimensões (mm)	Quant.
A	8	1,25	$48 \times 48 \times 45$	6
B	9	1,11	$54 \times 54 \times 45$	5

Quant.: quantidade

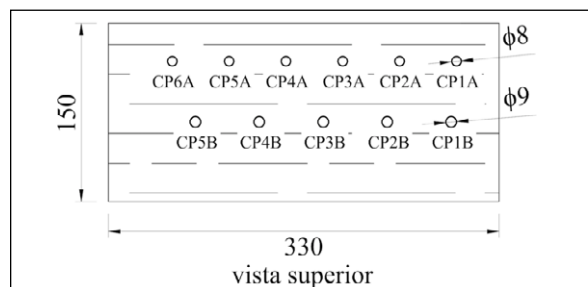
Fonte: dados dos autores

Os corpos de prova foram produzidos a partir do torneamento de cavilhas lisas de madeira de itaúba, com 10 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, e de uma peça de madeira de pinus, com dimensões de $330 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (Figura 1). Dois diâmetros de furos foram usinados no plano radial-tangencial da peça, na direção perpendicular às fibras (Figura 2a) e tangencialmente aos anéis de crescimento (Figura 2b)

Para a confecção dos corpos de prova do Grupo A, foram usinados 6 orifícios de 8 mm de diâmetro, com afastamento de 48 mm entre os centros, e, no mínimo, 32 mm das extremidades, ao longo do comprimento da peça. Em seguida, as cavilhas foram soldadas por fricção rotativa nos pré-furos da peça de madeira. Após a soldagem, a peça foi segmentada em 6 corpos de prova de $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$, mantendo a cavilha centrada (Figura 2). Cinco corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos de extração

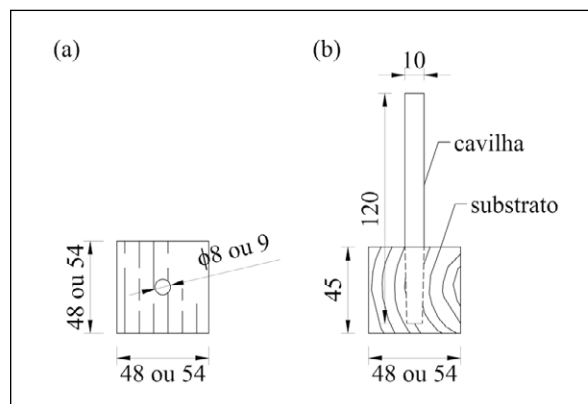
das cavilhas e analisados a nível macroestrutural, enquanto um corpo de prova foi submetido à análise microestrutural, conforme especificado na Tabela 3.

Figura 1 – Dimensões da peça de madeira de pinus (mm)



Fonte: dados dos autores

Figura 2 – Dimensões dos corpos de prova (mm) (a) vista superior; (b) vista frontal



Fonte: dados dos autores

Para a confecção dos corpos de prova do Grupo B, foram usinados 5 orifícios de 9 mm com afastamento de 54 mm entre os centros, e, no mínimo, 36 mm das extremidades, ao longo do comprimento da peça (Figura 1). Após a soldagem das cavilhas, por fricção rotativa, nos pré-furos da peça de madeira, esta foi segmentada em 5 corpos de prova de $54 \text{ mm} \times 54 \text{ mm}$, mantendo a cavilha centrada (Figura 2). Todos os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos de extração das cavilhas (Tabela 3). Posteriormente, foi analisada a resistência média da ligação soldada obtida para as duas relações diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25 e 1,11 (Grupos A e B).

Tabela 3 – Tamanho da amostra para os ensaios realizados

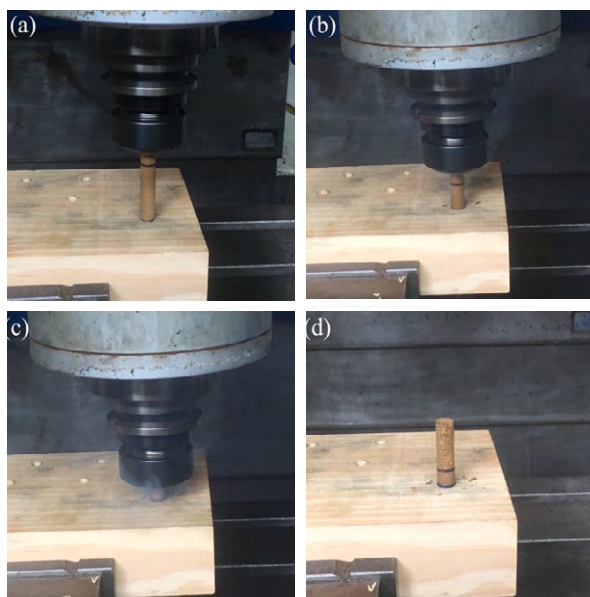
Ensaio	Grupo	Dimensões (mm)	Quantidade
Análise macroestrutural	A	24 × 24 × 45	5
Análise microestrutural	A	15 × 10 × 5	1
Ensaio mecânico de extração das cavilhas	A	48 × 48 × 45	5
	B	54 × 54 × 45	5

Fonte: dados dos autores

3.3 Soldagem por fricção rotativa (SFR)

Os ensaios de soldagem por fricção rotativa (SFR) foram realizados em um centro de usinagem de comando numérico (Figura 3), os quais consistiam em inserir as cavilhas de itaúba a uma profundidade de 40 mm em pré-furos usinados na peça de pinus. As velocidades de rotação e de avanço adotadas foram de 1000 rpm e de 500 mm/min, respectivamente.

Figura 3 – Processo de SFR



Fonte: arquivo dos autores

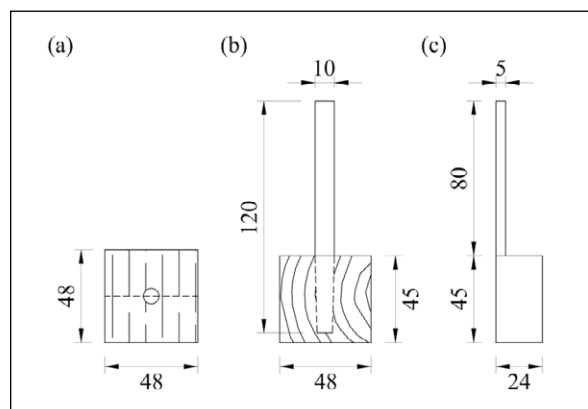
Após os ensaios de SFR e a segmentação da peça de pinus em 11 corpos de prova, esses foram expostos à temperatura e à umidade do ambiente por 15 dias, a fim de recuperarem o teor de umidade perdido durante o processo de SFR. Após esse período de estabilização, foram realizados os ensaios mecânicos

de extração das cavilhas e também as análises da macro e da microestrutura da interface soldada.

3.4 Análise macroestrutural

A análise macroestrutural dos corpos de prova do Grupo A, após a SFR, consistiu na avaliação da disposição e da espessura dos anéis de crescimento dos lenhos primaveril e estival dos substratos de madeira de pinus. Os corpos de prova foram seccionados, para permitir a análise da seção transversal da ligação soldada (Figuras 4a e 4b). Foram avaliadas as características da interface soldada e identificado o formato do pré-furo e da cavilha decorrente da SFR.

Figura 4 – Corpo de prova seccionado (a) vista superior; (b) vista frontal; (c) vista lateral



Fonte: dados dos autores

3.4.1 Determinação da conicidade das cavilhas

A determinação da conicidade das cavilhas dos corpos de prova do Grupo A foi feita após a realização dos ensaios mecânicos de extração das cavilhas. Para tanto, foi realizada uma medição do diâmetro máximo e do diâmetro mínimo de cada cavilha, com paquímetro com precisão de 0,01 mm. A conicidade foi calculada conforme Equação 1 (SMID, 2003).

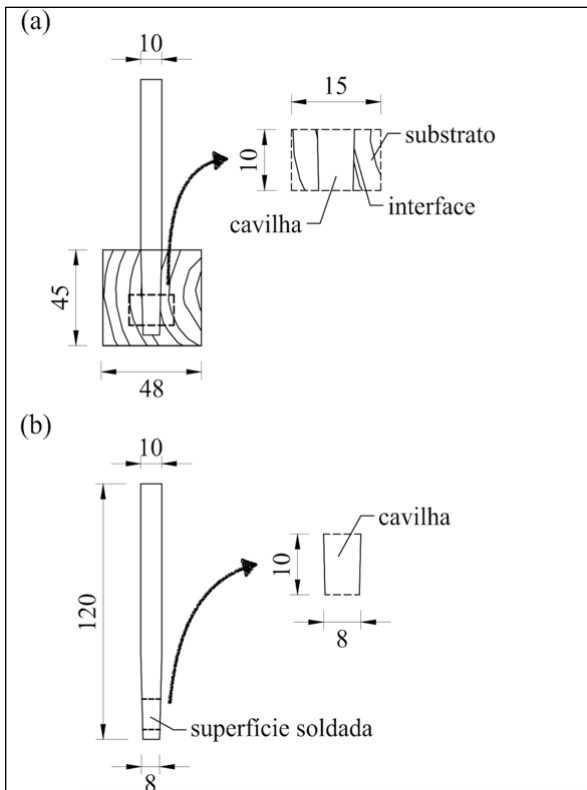
$$c = \frac{D - d}{L} \cdot 100, \quad (1)$$

sendo c a conicidade, em %; D o maior diâmetro da cavilha, em mm; d o menor diâmetro da cavilha, em mm; e L o comprimento de inserção da cavilha, em mm.

3.5 Análise microestrutural

Para avaliar a microestrutura da interface soldada, foram obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Um corpo de prova do Grupo A foi seccionado nas dimensões de 15 mm × 10 mm × 5 mm, contendo parte da cavilha, da interface soldada e do substrato. A cavilha também foi seccionada nas dimensões de 8 mm × 10 mm × 5 mm, a fim de se avaliar sua superfície soldada (Figura 5). As duas amostras foram secas em estufa à temperatura limitada a 40 °C para eliminar a umidade residual, a qual poderia influenciar na qualidade das imagens obtidas. Posteriormente, as amostras foram fixadas em stubs, recobertas com ouro em um spotter e levadas ao MEV para a realização das imagens.

Figura 5 – Obtenção das amostras para o ensaio de MEV (a) vista frontal da parte interna do corpo de prova; (b) vista frontal da parte externa da cavilha

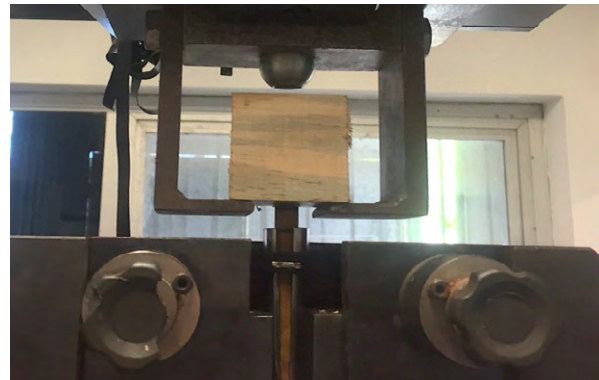


Fonte: dados dos autores

3.6 Ensaios mecânicos de extração das cavilhas

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de extração das cavilhas, para a determinação da resistência ao cisalhamento da interface soldada. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios de tração, pela aplicação de uma força de tração perpendicular às fibras da madeira do substrato e paralela às fibras da madeira da cavilha, até a ruptura da interface soldada, ocasionada pelo deslocamento da travessa do equipamento de ensaio (Figura 6).

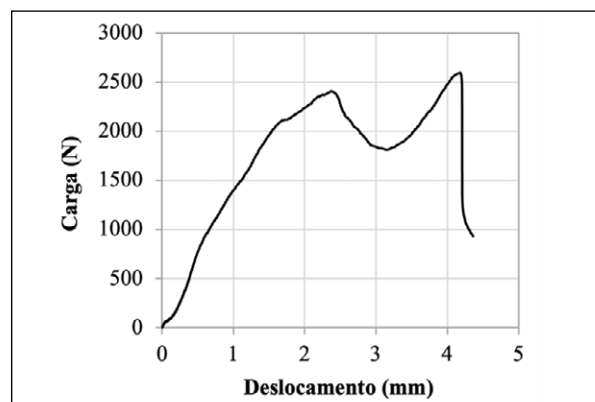
Figura 6 – Dispositivo do ensaio mecânico de tração



Fonte: arquivo dos autores

O carregamento aplicado na cavilha foi monotônico crescente, decorrente do deslocamento da travessa do equipamento a uma taxa de 2,0 mm/min. Por meio do sistema de aquisição de dados do equipamento, registrou-se a força de extração da cavilha de madeira de itaúba como função do deslocamento da travessa do equipamento (Figura 7).

Figura 7 – Curva carga × deslocamento da travessa do equipamento



Fonte: dados da pesquisa

3.6.1 Determinação da resistência ao cisalhamento da interface soldada

A determinação da resistência ao cisalhamento da interface soldada foi feita a partir do primeiro pico de força verificado no ensaio de extração da cavilha (Figura 7), considerando que ele causa danos irreversíveis na ligação soldada. Portanto, a resistência ao cisalhamento da superfície da solda foi expressa pela razão entre a força do primeiro pico e a área de soldagem, conforme a Equação 2 (BELLEVILLE *et al.*, 2016).

$$f_v = \frac{F_{pico}}{\pi dh}, \quad (2)$$

sendo a tensão de cisalhamento, em MPa; o primeiro pico de força, em N; d o diâmetro do pré-furo da peça, em mm; e h a profundidade de inserção da cavilha no substrato, em mm.

3.7 Análise estatística dos resultados

Os resultados relativos à força no primeiro pico e à tensão de cisalhamento na interface soldada por fricção rotativa foram analisados estatisticamente. Primeiramente, foi verificada a ocorrência de valores espúrios, eliminando-os (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Em seguida, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk com 5% de significância (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Posteriormente, como os dados dos Grupos A e B apresentaram distribuição normal, aplicou-se o teste-t de Student para dois grupos independentes, seguido da comparação entre as médias, considerando um intervalo de confiança de 90% (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Além disso, foi calculado o nível de confiança dos dados dos grupos a partir da tabela de distribuição normal padronizada (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

4 Resultados e discussão da pesquisa

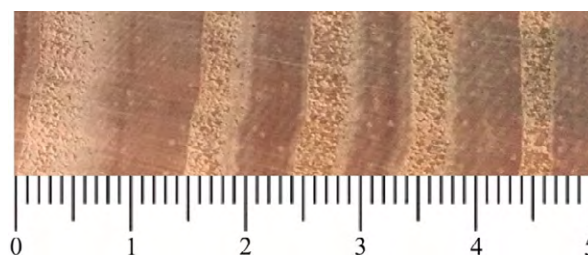
Nesta seção, são apresentadas as análises macro e microestrutural da interface soldada e os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova SFR.

4.1 Análise macroestrutural

A Figura 8 ilustra, para um corte transversal de um corpo de prova do Grupo A, a disposição dos anéis de crescimento da madeira de pinus. Verifica-se que

a espessura deles varia entre 9 e 14 mm. Observa-se também a irregularidade do crescimento dos anéis de lenho primaveril e estival da madeira de pinus, os quais possuem espessuras entre 2 e 8 mm. As variações da espessura dos anéis de crescimento de lenho primaveril e estival são devidas à influência do clima da região de origem da madeira (BODIG e JAYNE, 1993).

Figura 8 – Espessura dos anéis de crescimento da madeira de pinus em cm



Fonte: arquivo dos autores

Na Figura 9, considerando que a pré-furação para a inserção das cavilhas possui 8 mm de diâmetro, verifica-se que os furos abrangem de um a um e meio anéis de crescimento, de forma que a inserção da cavilha abrange no máximo dois anéis de crescimento, variando entre lenho primaveril e estival. A vista superior mostra que, nos corpos de prova CP1A, CP2A e CP3A, as cavilhas compreendem, essencialmente, dois anéis do lenho estival e um anel do lenho primaveril, enquanto, nos corpos de prova CP4A e CP5A, as cavilhas compreendem, principalmente, um anel do lenho estival e dois anéis do lenho primaveril.

Figura 9 – Disposição dos anéis de crescimento nos corpos de prova

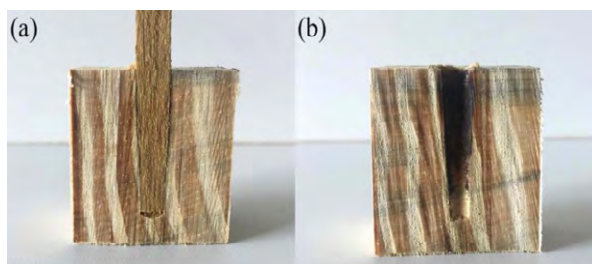


Fonte: arquivo dos autores

O corte transversal de um corpo de prova do Grupo A, antes e após a extração da cavilha, é ilustrado na Figura 10. Verifica-se que a disposição dos anéis de

crescimento sobre a seção transversal não é simétrica em relação ao eixo do pré-furo, de forma que, durante o processo de inserção da cavilha na peça, ela passou por regiões com características distintas.

Figura 10 – Corpo de prova do Grupo A seccionado (a) com cavilha; (b) sem cavilha



Fonte: arquivo dos autores

Na Figura 10 (b), observa-se o escurecimento da interface entre o substrato de madeira de pinus e a cavilha de madeira de itaúba que, segundo Pizzi *et al.* (2004), é ocasionado pelas altas temperaturas atingidas durante o processo de SFR. Além disso, verifica-se que o pré-furo e a cavilha, originalmente cilíndricos, assumem um formato cônico após o processo de SFR (Figura 11). À medida que a extremidade da cavilha é inserida no pré-furo, seu diâmetro é gradativamente reduzido, enquanto o diâmetro do pré-furo é gradativamente aumentado. A conicidade das cavilhas de 10 mm de diâmetro, soldadas em pré-furos de 8 mm de diâmetro (Grupo A), apresentou um valor médio de 4,5% e desvio padrão de 0,43. De acordo com Pizzi *et al.* (2004), a conicidade ocorre em virtude da pressão de contato e da temperatura promovidos pelo atrito entre as superfícies da cavilha e do pré-furo.

Figura 11 – Formato da cavilha (a) antes da soldagem; (b) após a soldagem



Fonte: arquivo dos autores

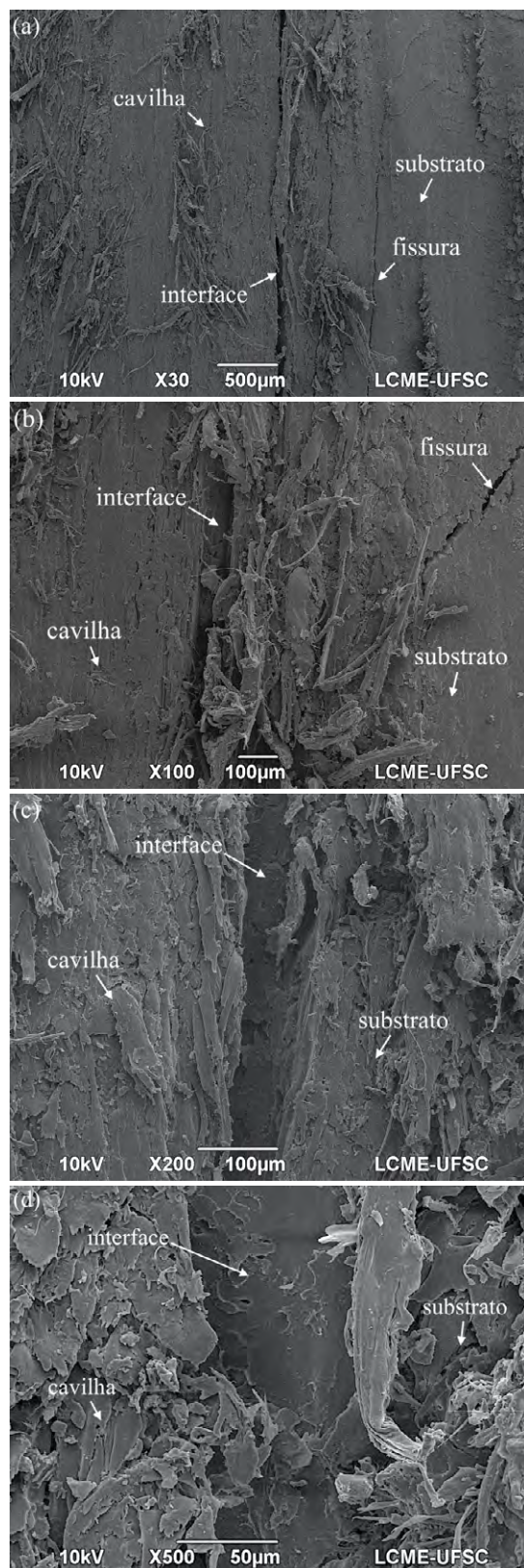
4.2 Análise microestrutural

A Figura 12 (a-d), na página seguinte, obtida por microscopia eletrônica de varredura, ilustra a microestrutura da interface soldada de uma amostra do Grupo A. Na Figura 12 (a), observam-se espaços entre a cavilha e o substrato. De acordo com Properzi *et al.* (2005), esse fato indica que compósitos densificados foram formados a partir do emaranhamento das fibras da madeira em uma matriz de material fundido. O mesmo foi relatado por Rodriguez *et al.* (2010) e Hu (2012) ao soldarem por fricção rotativa as madeiras *Acer saccharum* (632,3-678,5 kg/m³), *Betula alleghaniensis* (618,3-638,9 kg/m³) e *Fagus sylvatica* (600-750 kg/m³), as quais possuem massas específicas próximas a da amostra de madeira de pinus (588-613 kg/m³) usada nesta pesquisa.

A Figura 12 (b) ilustra detalhes da Figura 12 (a). Verifica-se a presença de fissura no substrato de pinus que, provavelmente, surgiu após o corte do corpo de prova para a realização do ensaio de MEV. Na Figura 12 (c-d) observa-se que, internamente, a ligação se mantém unida, além disso, a interface entre a cavilha e o substrato é uniforme e não apresenta fissuras, caracterizando uma soldagem bem-sucedida. Rodriguez *et al.* (2010) também relataram essas características ao soldarem a madeira *Acer saccharum* (632,3-678,5 kg/m³) por fricção rotativa. Percebe-se que é possível obter, para as madeiras estudadas, uma interface bem soldada a partir da relação diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25 e dos demais parâmetros adotados no procedimento experimental desta pesquisa.

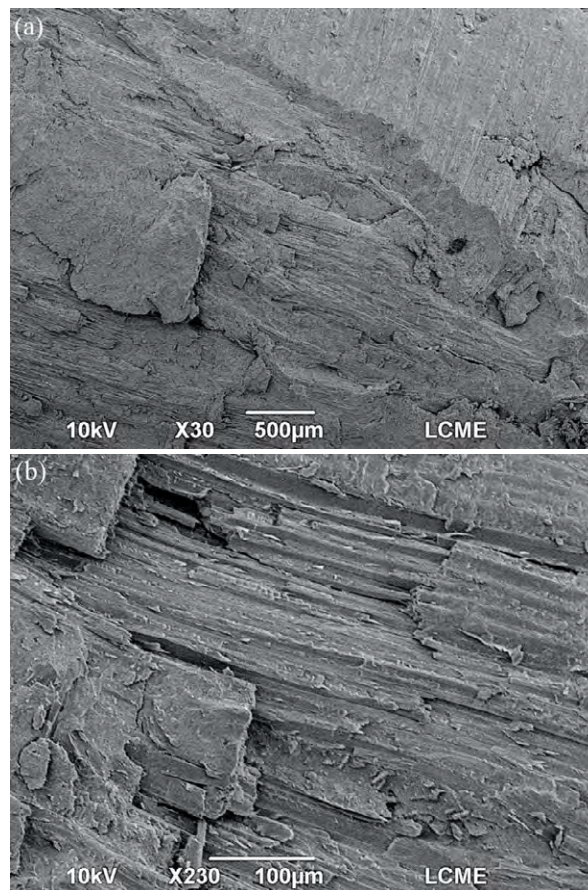
A Figura 13 (a-b), na página seguinte, ilustra a microestrutura da superfície da cavilha soldada. Observa-se que as fibras da madeira foram recobertas com material fundido, conforme relatado por Ganne-Chedeville *et al.* (2005). Esse fato indica que, durante a SFR, os polímeros fluíram ao longo da interface entre a cavilha e o substrato, formando uma ligação resistente. O mesmo foi relatado por Zhu *et al.* (2017) ao soldarem cavilhas de madeira de *Betula* spp. (557 kg/m³) em substratos de madeira *Larix gmelinii* (680 kg/m³).

Figura 12 – Microestrutura da interface soldada



Fonte: arquivo dos autores

Figura 13 – Microestrutura da superfície da cavilha após a SFR



Fonte: arquivo dos autores

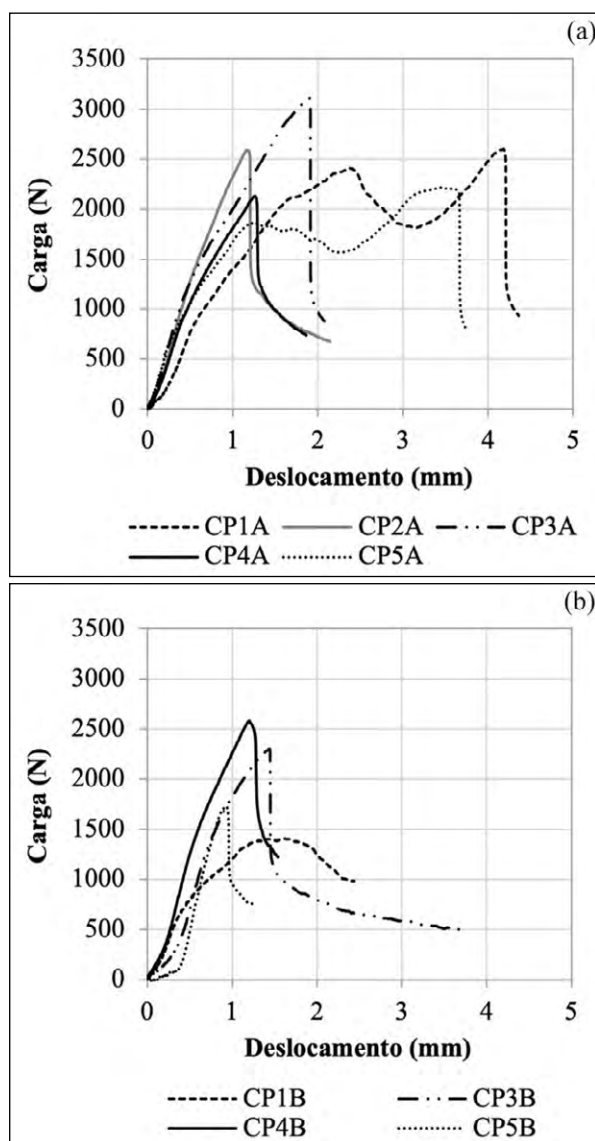
4.3 Curva carga × deslocamento

As curvas carga × deslocamento da travessa do equipamento, referentes aos corpos de prova dos Grupos A e B, são ilustradas na Figura 14 (a-b). Verifica-se que os corpos de prova do Grupo A apresentam um ou dois picos de força, enquanto os corpos de prova do Grupo B apresentam somente um pico. Inicialmente, registra-se um aumento quase linear da força em função do deslocamento da travessa. Após atingir o primeiro pico, verifica-se a redução da força para todos os corpos de prova dos Grupos A e B. Contudo, para CP1A e CP5A, após a redução de aproximadamente 80% da força correspondente ao pico inicial, essa volta a aumentar e atinge um novo pico 10 a 20% superior ao primeiro, o qual é seguido pela ruptura da ligação.

O comportamento das curvas força × deslocamento pode ser justificado pelo surgimento de fissuras internas durante a aplicação da carga. Segundo River (1994), em ligações de madeira

coladas, a fissuração se origina nas regiões de descontinuidade como a interface entre materiais que apresentam diferentes massas específicas e módulos de elasticidade, podendo se propagar de diferentes formas. Na madeira, as fissuras ocorrem em virtude de rupturas na parede celular ou de separações intercelulares (RIVER, 1994). No entanto, de acordo com Watson *et al.* (2013), na madeira, as superfícies das fissuras podem não se separar completamente, permanecendo ligadas por meio das fibras das células traqueídes, as quais dissipam a energia da fratura, ocasionando o aumento da tenacidade à fratura.

Figura 14 – Curvas força x deslocamento dos corpos de prova (a) Grupo A; (b) Grupo B



Fonte: dados da pesquisa

Observa-se que, para os grupos, os corpos de prova com maior resistência à extração da cavilha são os da região central da peça original de madeira de pinus, enquanto os corpos de prova com menor resistência se localizam nas extremidades. No Grupo A, os corpos de prova com a maior e a menor resistência à extração da cavilha (CP3A e CP5A) apresentam valores máximos de força de ruptura de 3110 N e 1868 N, respectivamente (Figura 14a). Enquanto, no Grupo B, os corpos de prova com a maior e a menor resistência (CP4B e CP1B) apresentam valores máximos de força de ruptura de 2583 N e 1409 N, respectivamente (Figura 14b).

Embora todos os corpos de prova fossem originados da mesma peça de madeira e os ensaios fossem realizados sequencialmente, verificam-se resultados distintos entre corpos de prova oriundos da mesma peça de pinus. Essa distinção entre os resultados pode estar relacionada aos anéis de crescimento que as cavilhas abrangeram, durante sua inserção no substrato de pinus. Segundo Rowell (2005), os anéis do lenho estival são mais densos que os anéis do lenho primaveril. Esse fato pode ter influenciado na resistência da ligação, visto que em alguns corpos de prova, como o CP4A e CP5A, as cavilhas abrangeram, essencialmente, dois anéis do lenho primaveril e apenas um anel do lenho estival (Figura 9). Segundo Župčić *et al.* (2014), variações de densidade na mesma espécie de madeira influenciam na resistência da ligação soldada, visto que o aumento da densidade da madeira resulta no aumento da resistência mecânica da ligação soldada.

4.4 Resistência ao cisalhamento

Os resultados de força no primeiro pico da curva carga x deslocamento e as respectivas tensões de cisalhamento na ruptura, referentes aos corpos de prova dos Grupos A e B, são apresentados na Tabela 4.

No Grupo A, a média da tensão de cisalhamento na ruptura é de 2,41 MPa e o coeficiente de variação é de 19,6%. A análise estatística indica que, para a média obtida, os dados apresentam um nível de confiança de 75%. No Grupo B, após a eliminação do resultado do corpo de prova CP2B, que é considerado espúrio, a média da tensão de cisalhamento na ruptura é de 1,77 MPa e o coeficiente de variação é de 26,7%. Para a média obtida, a análise estatística indica que os dados apresentam um nível de confiança de 60%.

Tabela 4 – Valores de força no primeiro pico da curva e de tensão de cisalhamento na ruptura para os corpos de prova

Corpo de prova	Força no primeiro pico (N)	Tensão de cisalhamento na ruptura (MPa)
CP1A	2402	2,39
CP2A	2590	2,58
CP3A	3110	3,10
CP4A	2125	2,11
CP5A	1868	1,86
CP1B	1409	1,25
CP3B	2298	2,03
CP4B	2583	2,28
CP5B	1729	1,53

Fonte: dados da pesquisa

Observa-se que, no Grupo A, as tensões de cisalhamento na ruptura apresentam uma diferença entre os valores máximo e mínimo de 40%, entre os corpos de prova CP3A e CP5A, enquanto que, no Grupo B, a diferença entre os valores máximo e mínimo da tensão é de 45%, entre os corpos de prova CP1B e CP4B. Esse comportamento pode estar correlacionado à heterogeneidade da madeira, uma vez que as diferenças anatômicas do material influenciam na temperatura obtida durante o processo de soldagem e, conseqüentemente, nas propriedades da interface soldada (BELLEVILLE *et al.*, 2013). De acordo com Pizzi *et al.* (2004), a resistência da interface também está relacionada à contração diferencial ocasionada pelo resfriamento da cavilha e do substrato, após o processo de SFR.

Verifica-se que os valores de tensão de cisalhamento na ruptura obtidos nesta pesquisa são similares aos valores relatados por Belleville *et al.* (2016) ao soldar as madeiras das espécies *Eucalyptus saligna* (784 kg/m³) e *Tectona grandis* (598 kg/m³) por fricção rotativa. Isso demonstra que a soldagem de cavilhas de madeira de itaúba em substratos de madeira de pinus pode ser realizada com desempenho mecânico similar ao obtido em estudos australianos.

O teste de comparação de médias, realizado por meio do teste-t de Student para grupos independentes, indica que existe diferença estatisticamente significativa entre as tensões de cisalhamento médias dos Grupos A e B. A tensão de cisalhamento média do Grupo A, com relação diâmetro cavilha/pré-furo igual a 1,25,

é 17% superior à média obtida para o Grupo B, com relação diâmetro cavilha/pré-furo de 1,11. Pizzi *et al.* (2004) observaram que a melhor relação diâmetro cavilha/pré-furo é 1,25, ao soldar cavilhas de madeira de *Fagus sylvatica* (600-750 kg/m³) em substratos de madeira de *Picea abies* (405-425 kg/m³) e *Fagus sylvatica*. Rodriguez *et al.* (2010) também relataram que, ao soldar as madeiras *Acer saccharum* (632,3-678,5 kg/m³) e *Betula alleghaniensis* (618,3-638,9 kg/m³), a relação diâmetro cavilha/pré-furo de 1,26 apresentou os melhores resultados de resistência à ruptura.

O comportamento da SFR das madeiras de itaúba (808-831 kg/m³) e de pinus (588-613 kg/m³), oriundas, respectivamente, de florestas nativas e plantadas no Brasil é similar ao comportamento relatado para a SFR de madeiras europeias, canadenses e australianas, o qual indica que, para madeiras com massas específicas inferiores a 900 kg/m³, a melhor relação diâmetro cavilha/pré-furo é de 1,25. Porém, recomenda-se a realização de estudos adicionais referentes à soldagem de cavilhas de itaúba em substrato de pinus, usando uma amostra maior, para aumentar o nível de confiança dos resultados. Também é importante testar maiores relações de diâmetro cavilha/pré-furo, a fim de verificar a continuidade da tendência de aumento da resistência em função do aumento da relação diâmetro cavilha/pré-furo.

5 Conclusão/Considerações

Na presente pesquisa foi avaliada a SFR de cavilhas em itaúba em pré-furos usinados em substrato de madeira de pinus, usando duas relações de diâmetro cavilha/pré-furo: 1,25 e 1,11, a fim de avaliar as características e a resistência ao cisalhamento das interfaces SFR. A amostra era constituída de 11 corpos de prova, dos quais 5 dos Grupos A e B foram submetidos a ensaios mecânicos de extração da cavilha. Os resultados permitem concluir que:

- é possível soldar cavilhas de madeira de itaúba com 10 mm de diâmetro, por fricção rotativa, em substratos de madeira de pinus com pré-furos de 8 e 9 mm de diâmetro;
- os corpos de prova compostos de cavilhas de 10 mm de diâmetro soldadas em substratos com pré-furo de 8 mm de diâmetro apresentam resistência à ruptura máxima de 3,10 MPa, enquanto os corpos de prova com pré-furo de

9 mm de diâmetro apresentam resistência à ruptura máxima de 2,28 MPa;

- entre as duas relações de diâmetro cavilha/pré-furo estudadas, a relação de 1,25 apresenta uma superfície soldada com maior resistência ao cisalhamento na ruptura;
- a microestrutura da interface soldada é livre de fissuras e descontinuidades, para a relação diâmetro cavilha/pré-furo de 1,25 e os demais parâmetros adotados na presente pesquisa.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradecemos ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME-UFSC) pelo suporte técnico durante os ensaios de MEV.

REFERÊNCIAS

AUCHET, S. *et al.* Accelerating vs constant rate of insertion in wood dowel welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 24, p. 1319-1328, 2010.

BELLEVILLE, B. *et al.* Wood blockboards fabricated by rotational dowel welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 25, p. 2745–275, 2011.

BELLEVILLE, B. *et al.* Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 27, n. 5-6, p. 566-576, 2013.

BELLEVILLE, B. *et al.* Assessing the potential of wood welding for Australian eucalypts and tropical species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, p. 753-757, 2016.

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

BOCQUET, J.-F. *et al.* Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 21, n. 3-4, p. 301–317, 2007.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger, 1993.

CARRASCO, E. V. M.; MACIENTE, H. S. Contribuição à técnica da soldagem de peças de madeira. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, v. 23, p. 30-41, 2008.

GANNE-CHEDEVILLE, C. *et al.* Parameter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 19, p. 1157-1174, 2005.

HU, J. **Optimisation du soudage du bois avec des additives naturel non toxique respectueux de l'environnement**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal, Agronomia e Ambiental) – Université de Lorraine, França, 2012.

KANAZAWA, F. *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. *et al.* Wood welding: A challenging alternative to conventional wood gluing. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 20, p. 534-538, 2005.

MARTINS, S. A. **Processamento termo-hidro-mecânico da madeira de Eucalyptus benthamii (Maiden e Cambage)**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3. ed. New York: Wiley, 2003.

PIZZI, A. *et al.* Mechanically-induced wood welding. **Maderas: ciencia y tecnología**, v. 5, n. 2, p. 101-106, 2003.

PIZZI, A. *et al.* Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 18, n. 11, p. 1263-1278, 2004.

PIZZI, A. *et al.* Enhancing the Exterior Performance of Wood Joined by Linear and Rotational Welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 25, p. 2717-2730, 2011.

PIZZI, A. Wood Joints Adhesion and Performance in Mechanical Friction Welding of Wood without Adhesives. *In*: GUTOWSKI, W.; DODIUK, H. **Recent Advances in Adhesion Science and Technology**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

PROPERZI, M. *et al.* Influence of grain direction in vibrational wood welding.

Holzforschung, v. 59, p. 23-27, 2005.

RIVER, B. H. Fracture of adhesive-bonded wood joints.

In: PIZZI, A.; MITTAL, K.L. **Handbook of Adhesive Technology**. New York: Marcel Dekker, 1994.

RODRIGUEZ, G. *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.

ROWELL, R. M. **Wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

SCHNEID, E.; MORAES, P. D. União de peças de madeira por meio da técnica de soldagem por fricção rotacional. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 15., 2015, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IBRAMEM, 2015.

SMID, P. **CNC Programing Handbook**. 2. ed. New York: Industrial Press Inc., 2003.

STAMM, B.; NATTERER, J.; NAVI, P. Joining wood by friction welding. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 63, p. 313-320. 2005a.

STAMM, B.; NATTERER, J.; NAVI, P. Joining of wood layers by friction welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 19, n. 13-14, p. 1129-1139, 2005b.

WATSON, P. *et al.* Fracture properties of adhesive joints under mechanical stresses. **Wood Research**, v. 58, n. 1, p. 43-56, 2013.

ZHU, X. *et al.* Mechanics and pyrolysis analyses of rotation welding with pretreated wood dowels. **Journal of Wood and Science Technology**, v. 63, p. 216-224, 2017.

ZHU, X. *et al.* Mechanics and crystallinity/thermogravimetric investigation into the influence of the welding time and CuCl_2 on wood dowel welding. **Bioresources**, v. 13, n. 1, p. 1329-1347, 2018.