






Modificação térmica e adesão em madeiras de reflorestamento usando adesivos estruturais

Thermal modification and adhesion in reforestation wood using structural adhesives

Caterina Carvalho Buratta 
Alexandre Miguel do Nascimento 
Jaqueline Rocha de Medeiros 
Natália Dias de Souza 
Roberto Carlos Costa Lelis 

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico na qualidade da adesão de juntas coladas de madeira de alta densidade, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* utilizando os adesivos resorcinol e poliuretano vegetal à base de óleo de mamona. O tratamento térmico foi realizado nas temperaturas de 160 °C, 180 °C e 200 °C, sendo comparadas com um lote controle. A qualidade da colagem foi avaliada através do teste de cisalhamento e análise do percentual de falha na madeira. O adesivo de poliuretano de mamona apresentou maiores valores de viscosidade e teor de sólidos, do que o resorcinol formaldeído. O *Eucalyptus pellita* exibiu maiores valores de resistência ao cisalhamento que a madeira de *Corymbia citriodora*. O aumento da temperatura reduziu a resistência ao cisalhamento para ambas as madeiras. A razão entre a resistência da madeira colada com madeira sólida, na mesma temperatura de tratamento, muitas vezes atingiu valores superiores a um, indicando a formação de um compósito adesivo-fibras, que aumenta a resistência da interface colada, especialmente para madeira de *C. citriodora*. De forma geral, houve uma melhor colagem da madeira de *Eucalyptus pellita*, com resorcinol formaldeído, e está exibiu menor degradação térmica, devido à menor perda de massa.

Palavras-chave: Resorcinol formaldeído. Poliuretano de mamona. Resistência ao cisalhamento. *Eucalyptus pellita*. *Corymbia citriodora*.

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of thermal treatment on the adhesion quality of bonded joints in high-density wood, specifically Corymbia citriodora and Eucalyptus pellita, using resorcinol formaldehyde and castor oil-based polyurethane adhesives. It was used at temperatures of 160 °C, 180 °C and 200 °C, being compared with a control batch. The percentage of failure in the wood was analyzed to evaluate the quality of the bonding. The castor oil-based polyurethane adhesive exhibited higher values of viscosity and solid content than resorcinol formaldehyde. Eucalyptus pellita showed higher shear strength values compared to Corymbia citriodora wood. The increase in temperature reduced the shear strength for both woods. The ratio between the strength of the bonded wood and solid wood, at the same treatment temperature, often exceeded one, indicating the formation of an adhesive-fiber composite, which enhances the strength of the bonded interface, especially for C. citriodora wood. Overall, there was better bonding of Eucalyptus pellita wood with resorcinol formaldehyde, and it exhibited less thermal degradation due to lower mass loss.

Keywords: Resorcinol formaldehyde. Castor bean polyurethane. Shear strength. *Eucalyptus pellita*. *Corymbia citriodora*.

Recebido em 12/04/23
Aceito em 19/10/23

Introdução

A madeira é um material natural e sustentável, que pode ser utilizado para diversas finalidades e que apresenta características desejáveis para aplicação estrutural, como alta relação resistência/peso, e baixo consumo de energia para sua produção. Além disso, apresenta ainda renovabilidade, capacidade de suporte de carga e flexibilidade de design (Kubovsky; Cíková; Kačík, 2020).

Com a alta demanda por produtos madeireiros, o uso da madeira de reflorestamento, reduz a exploração dos recursos naturais nativos. A madeira reflorestada assume o mercado de produtos de madeira engenheirada, para a fabricação de painéis, madeira laminada colada, entre outros, uma vez que o processo de plantio e colheita apresenta alta produtividade e baixos custos em relação à madeira nativa brasileira (Segundinho *et al.*, 2017).

Apesar das vantagens madeira tem comportamento higroscópico, o que resulta em alterações volumétricas expressivas, especialmente aquelas do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia*, podendo ainda apresentar algumas características, como a grã irregular e presença de nós. Além disso, a dimensão das peças de madeira serrada é limitada pelo comprimento e diâmetro das toras, sendo um fator limitante da utilização de madeira quando se precisa de produto com grandes dimensões. Deste modo, a colagem de peças de madeira amplia sua utilização, permitindo um melhor aproveitamento da matéria prima, e aumentando a diversidade do uso, com a formação de peças de maior dimensão (Nogueira *et al.*, 2022).

Fatores diversos influenciam na qualidade da colagem da madeira, alguns associados ao material adesivo e ao aderente e a interação adesivo-aderente. No caso de colagem da madeira do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia*, o aspecto anatômico tem muita influência, pois apresenta poros de pequenos diâmetros, que podem estar obstruídos por tilos, dificultando a penetração do adesivo (Santiago *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2020). A densidade elevada da madeira, de algumas espécies dentro do gênero, é outro fator a ser observado, pois estas não correspondem bem à colagem, devido à sua baixa porosidade, considerando ainda o alto teor de extrativos e sua instabilidade dimensional (Nunes *et al.*, 2016; Santiago *et al.*, 2018).

A variação do teor de umidade equilíbrio da madeira, ao longo da vida útil do material é função da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente (Chiniforush *et al.*, 2019) o que faz que a madeira retraia ou inche com as oscilações da sua umidade. Pesquisadores vêm buscando alternativas de tratamento que modifique algumas propriedades tecnológicas da madeira, tais como: redução da contração e inchamento da madeira, e a diminuição da susceptibilidade ao ataque de organismos xilófagos (Sugahara *et al.*, 2022).

Com tal objetivo, a modificação térmica da madeira, surgiu no ano de 1940 na Europa, e de acordo com Hill (2006), durante o processo, e ao final da vida útil da matéria prima tratada, apresenta a vantagem de não liberar substâncias tóxicas no ambiente, produtos normalmente usados na preservação, com objetivo de aumentar a vida útil da matéria prima.

Além de diminuir a susceptibilidade a organismos xilófagos, aumentando a classe de uso dessa madeira, o processo de modificação térmica, diminui seu coeficiente de retratilidade (Safin *et al.*, 2021).

O fator temperatura de tratamento gera, à medida que se aumenta a temperatura, maiores alterações físico-químicas, que afetam o comportamento da madeira. Quando submetida a temperaturas superiores a 100 °C ocorre a diminuição das hidroxilas livres, e com isso pode aumentar a penetração dos adesivos no produto modificado termicamente (Bastani *et al.*, 2016; Bastani; Adamopoulos; Miltz, 2017)

Outro fator importante na determinação da qualidade da junta colada, é o tipo de adesivo utilizado, que podem ser destinados a uso externo, uso interno ou uso estrutural. Atualmente, os adesivos poliméricos são os mais utilizados na indústria. O resorcinol formaldeído tem alta aplicabilidade, devido a capacidade de suportar altas tensões, resistência a umidade e ainda variações de temperaturas do ambiente. No entanto, esse adesivo libera formaldeído para o meio ambiente, um gás incolor com elevado nível de toxicidade, podendo causar sérios danos à saúde do homem (Chen; Wu; Chen, 2021). Esses adesivos são derivados do petróleo, além da liberação de formaldeído, os adesivos poliméricos têm participação na liberação de CO₂ na atmosfera, contribuindo para as mudanças climáticas (Faria *et al.*, 2020).

Nas últimas décadas a tendência mundial é busca na utilização de matéria prima de origem renovável, e sustentável, que não ofereça ou reduza os riscos ao meio ambiente e ao bem-estar humano. Diante do exposto, surge a necessidade de pesquisas com alternativas de adesivos que não sejam nocivos, ora no processo de colagem, ora durante ou após a vida útil do produto.

Os adesivos de poliuretano apresentam uma composição química variada, podendo ser manipulados para aplicação adaptável nos mais variados designs de colagem. Devido a plasticidade e elasticidade, esses adesivos apresentam distribuição uniforme na linha de cola, aumentando a resistência da junta, e ainda, tem a

isenção da liberação de formaldeído, apresentando coloração clara, com tons entre bege e branco. Pode ser utilizado para colagem de madeira com alto teor de umidade, e o processo de cura e prensagem pode ocorrer em temperatura ambiente, dispensando o uso de calor (Shirmohammadli *et al.*, 2023).

A adição de óleos vegetais ricos em ácidos graxos insaturados, na composição do poliuretano tem ocorrido, na busca de alternativa biológica e formulando adesivos mais resistentes (Shirmohammadli *et al.*, 2023). O óleo de mamona possui boas características para fabricação de adesivos, como estabilidade térmica, alta resistência físico-mecânica, devido ao caráter hidrofóbico dos triglicerídeos, atrelado a baixo custo, e baixa toxicidade (Gurunathan *et al.*, 2013; Sawpan, 2018). De acordo com Faria *et al.* (2020), o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona é renovável, e não agressivo ao meio ambiente.

Para o gênero eucalipto, o adesivo de poliuretano de mamona mostrou-se eficiente nestes de compressão normal às fibras para híbridos da madeira de *Eucalyptus* (Segundinho *et al.*, 2021), e quando comparado ao resorcinol, foi observado maior força de união na colagem da madeira, fato explicado pois o poliuretano apresentou maior molhabilidade, conferindo assim maior penetração do mesmo (Bianche *et al.*, 2022).

Faria *et al.* (2020), estudando diferentes gramaturas de adesivos na colagem de lâmina da madeira de *Hevea brasiliensis*, obteve linha de cola distribuída uniforme, para todas as gramaturas. Indicando que mesmo utilizando pouco adesivo, a colagem é eficiente, devido a boa viscosidade do adesivo. Na mesma pesquisa, os autores encontraram melhores resultados no teste de cisalhamento para o adesivo de poliuretano, comparado ao adesivo de resorcinol formaldeído.

Sendo assim, essa pesquisa tem como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico na qualidade da adesão de madeira jovem proveniente de espécie reflorestada de rápido crescimento, coladas com adesivo de resorcinol formaldeído e resina bi componente de poliuretano de mamona.

Material e métodos

Preparação de materiais e desenho experimental

As madeiras utilizadas neste trabalho foram obtidas de 3 árvores de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L.A.S. Johnson e 3 árvores de *Eucalyptus pellita* F. Muell, com 17 anos de idade. As árvores foram desdobradas em pranchas com corte tangencial e dispostas para secar ao ar livre. Após secas foram desdobradas em amostras segundo a orientação da D905-08 (ASTM, 2021), com dimensão final de 31 cm × 5 cm × 1,9 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente e dispostas em câmara climática a com temperatura média de 22 °C e 65% de umidade relativa média (UR), até massa constante. Após equilíbrio higroscópico, as amostras foram pesadas e medidas para se calcular sua densidade aparente e assim garantir que cada tratamento tivesse densidades equivalentes, e assim evitar o efeito da densidade nos resultados. Foram selecionadas as amostras sem presença de nós, rachaduras, superfície irregular, ou outras características na superfície que pudesse dificultar o processo de colagem. Foi delineado um experimental fatorial, inteiramente casualizado onde se testou os fatores e suas interações: adesivos (resorcinol-formol e resina composta à base de óleo de mamona), temperatura de tratamento térmico (160 °C, 180 °C e 200 °C) e as madeiras (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*)

Tratamento térmico da madeira

O tratamento térmico foi realizado nas temperaturas de 160 °C, 180 °C e 200 °C sendo modificadas 6 amostras para cada tratamento destinados à colagem. Um grupo de amostras foi selecionado para não receber tratamento térmico, servindo como grupo controle, e 6 corpos de prova foram destinados a determinar a resistência ao cisalhamento da madeira sólida, para cada condição de temperatura, assim com o controle.

Foi utilizado um forno mufla elétrico da marca *Linn Elektro Therm*, com dimensões de 60 cm x 60 cm x 70 cm. Os tratamentos foram realizados em quatro etapas para cada temperatura, sendo estas:

- (a) as amostras foram aquecidas até a temperatura de 100 °C em um período de 120 minutos;
- (b) a temperatura foi de 100 °C até a temperatura para cada tratamento em 40 minutos;
- (c) as amostras permaneceram na temperatura de tratamento por 90 minutos; e
- (d) as amostras permaneceram no mínimo 120 minutos dentro da mufla, até o resfriamento do material.

Após o tratamento térmico, as amostras foram novamente pesadas e levadas para climatização até o peso constante. A porcentagem de perda de massa do tratamento foi obtida subtraindo a massa da madeira antes do

tratamento, descontado o teor de umidade, pela massa após tratamento, dividindo a diferença anterior, pela massa inicial anidra.

Caracterização dos adesivos

Para o processo de colagem, foram utilizados uma resina à base de resorcinol-formol, o Cascophen RS 216 (RF), e uma resina composta à base de óleo de mamona, o AGT 1315 (PM). Foram calculados o teor de sólidos e a viscosidade dos adesivos de acordo com as normas 1417 (ASTM, 2016) e D1200 (ASTM, 2018), respectivamente.

Processo de colagem da madeira

Antes da aplicação dos adesivos, as amostras foram passadas em plaina desempenadeira para garantir uma superfície plana. Foram produzidas três juntas coladas para cada tratamento estabelecido, com aplicação de adesivo na gramatura de 350 g/m², e com adição de 5% de metanol para o adesivo resorcinol formaldeído.

Após o espalhamento uniforme do adesivo e união consecutiva de cada par de amostras, as juntas coladas foram transferidas para uma prensa sob pressão de 11 kgf/cm² durante 24 horas.

Determinação da densidade aparente e do teor de umidade de equilíbrio das juntas coladas

Para a determinação da densidade aparente, utilizou-se a norma D2395 (ASTM, 2017). Entretanto, para as análises do grau de umidade de equilíbrio, adotou-se a Equação 1.

$$T_{ue} = (M_u - M_s) / M_s \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

T_{ue} = Teor de umidade de equilíbrio (%);

M_u = Massa da amostra em câmara climatizada a 20 °C e 65% UR (g); e

M_s = Massa da amostra seca em estufa, até peso constante 103±2 °C (g).

Teste de resistência ao cisalhamento em madeira maciça e juntas de madeira

A metodologia de ensaio de resistência ao cisalhamento seguiu as normas D905-08 (ASTM, 2021) e D143 (ASTM, 2014), respectivamente para as juntas coladas e madeira maciça. As dimensões do corpo de provas utilizados estão descritas na Figura 1.

Os valores de resistência da junta colada foram obtidos pela força de ruptura de cada corpo de prova pela sua área de adesão e do mesmo modo para madeira sólida, sendo a área a seção comum entre o menor e o maior bloco. A resistência relativa das juntas coladas (R_r) foi obtida dividindo-se o valor da resistência das amostras de madeira coladas pela média da resistência da madeira sólida, na mesma categoria de temperatura e espécie. A resistência relativa da madeira sólida foi obtida dividindo-se a resistência da madeira tratada termicamente pela resistência da madeira não tratada (controle). Após a ruptura do corpo de prova colado, uma metade foi destinada a determinação do percentual de falha na madeira e a outra metade foi destinada a determinação das densidades e umidades individuais.

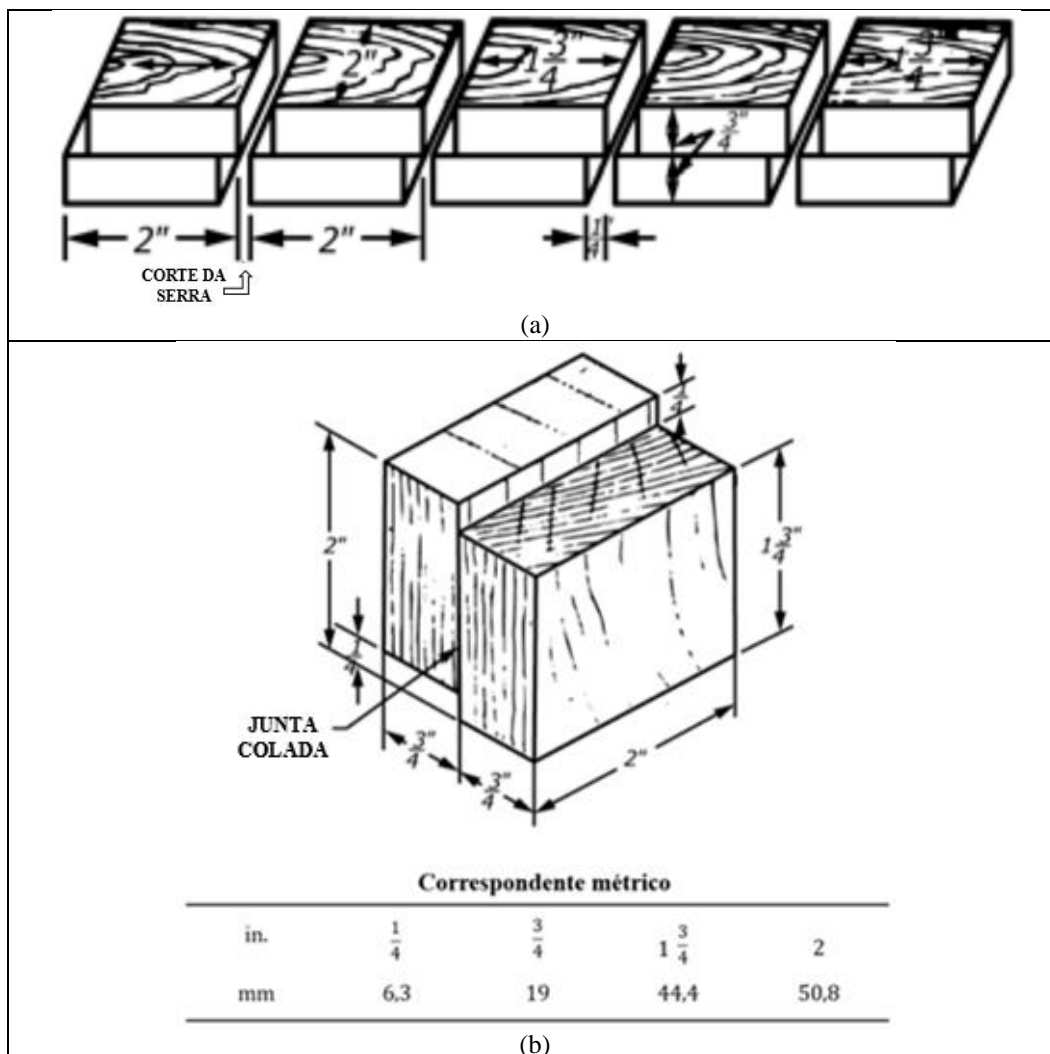
Falha da madeira em juntas e parâmetros de desempenho adesivo

Para estimar o percentual de falha da madeira, adotou-se a norma D5266-13 (ASTM, 2014) e para avaliar o desempenho dos adesivos, adotou-se a norma D5751-99 (ASTM, 2019).

Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software Statsoft versão 14, adotando-se um intervalo de confiança de 95%. Para verificação dos pressupostos do teste paramétrico, foram utilizados os testes de Brown-Forsythe, Kolmogorov-Smirnov, para verificação da homocedasticidade de variância e normalidade dos dados, respectivamente. Análise de variância fatorial foi utilizado testando-se os fatores: tratamentos térmicos, adesivos e madeiras e suas interações. Quando o teste F foi significativo, o teste de Tukey foi utilizado. A correlação de Pearson, também foi aplicada nos resultados de densidade, umidade, temperaturas de tratamento térmico e resistência ao cisalhamento.

Figura 1 - (a) Esquema para obtenção dos corpos-de-prova a partir da junta colada e (b) Dimensões e forma da amostra teste.



Fonte: adaptado de D905-08 (ASTM, 2021).

Resultados e discussão

Teor de umidade, densidade aparente e perda de massa

Os valores de densidade e teor de umidade das juntas são apresentados na Tabela 1. As madeiras utilizadas são classificadas como de alta densidade (Melo; Coradin; Mendes, 1990). Apesar das madeiras de alta densidade, serem mais resistentes (Santiago *et al.*, 2018), elas apresentam maior dificuldade no processo de colagem, devido à baixa permeabilidade aos adesivos (Oliveira *et al.*, 2020). Ahmad *et al.* (2017), comparando a resistência ao cisalhamento de madeira colada com diferentes densidades, encontrou maiores valores de resistência para as madeiras com classes de densidade mais baixas. A madeira de *E. pellita*, tratada termicamente, teve menor redução de perda de massa (4,9%) do que o *C. citriodora* (6,4%), indicando menor degradação térmica, chegando a 10% para madeira de *C. citriodora* tratada a 200 °C. Em cada condição de tratamento térmico a madeira de *E. pellita* sempre apresentou valor numérico inferiores.

A perda de massa da madeira ocorre devido a desidratação das paredes celulares, resultante da remoção de água, bem como a volatilização dos compostos voláteis. Também pode ser atribuída a degradação das hemiceluloses, componente estrutural da parede celular mais susceptível a ação do calor, resultando em modificações irreversíveis. A degradação das hemiceluloses está associada a menor absorção de água, ocasionando na diminuição do teor de umidade equilíbrio da madeira (Medeiros *et al.*, 2022), esse fenômeno pode ser observado na tabela acima.

Tabela 1 - Valores de densidade aparente para os respectivos teores de umidade de equilíbrio das juntas coladas, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita*

Tratamento (°C)	<i>C. citriodora</i>					<i>E. pellita</i>				
	ρ aparente		T.U (%)		PM (%)	ρ aparente		T.U (%)		PM (%)
	Média	Delta %	Média	Delta %	Média	Média	Delta %	Média	Delta %	Média
Controle	0,844	0	11,8	0	0,0	0,741	0	11,7	0	0,0
160 °	0,818	3	8,3	30	5,9	0,735	1	10,1	14	2,0
180 °	0,765	9	6,9	42	9,7	0,716	3	6,9	41	8,7
200 °	0,773	8	6,1	48	10,0	0,728	2	6,2	47	9,0
Média	0,800	5,2%	8,3	29,9	6,4	0,730	1,5	8,7	25,4	4,9

Nota: ρ aparente: Densidade aparente da madeira na condição do teor de umidade encontrado, em g/cm³. TU (%): teor de umidade de equilíbrio das madeiras. Delta é a variação percentual da densidade e umidade, numa determinada temperatura, comparado ao controle. PM (%): Perda de massa das amostras.

Valores de umidade de equilíbrio são inversamente proporcionais ao aumento da temperatura de tratamento, fato este explicado pela redução da higroscopicidade da madeira devido à degradação da hemicelulose e redução dos grupos hidroxílicos, ocasionado pela cristalização da celulose (Ferreira; Silva; Campos, 2017). Os valores de umidade de equilíbrio das duas madeiras, na mesma temperatura, são próximos, com exceção do tratamento de 160 °C onde a espécie *E. pellita* apresentou uma umidade de 10,1 % enquanto o *C. citriodora* mostrou valores de 8,3 %.

A correlação entre as temperaturas de tratamento e teor de umidade das madeiras foi significativa e negativa para ambas as espécies, apresentando valores altos de correlação de -0,84 e -0,88 para *C. citriodora* e *E. pellita*, respectivamente (Tabela 2). A correlação entre resistência ao cisalhamento e temperatura de tratamento, apresentou valores significativos e negativos para ambas as espécies, sendo maior para madeira de *C. citriodora*, revelando que esta madeira foi mais afetada pela temperatura na resistência do material. Com aumento da temperatura de modificação térmica, houve redução no teor de umidade equilibrado e da resistência ao cisalhamento, esse comportamento é esperado para amostras que passam pelo processo de aquecimento (Carvalho *et al.*, 2015; Ferreira; Silva; Campos, 2017).

Houve correlação negativa e significativa entre densidade e temperatura de tratamento apenas para a espécie *C. citriodora*, confirmando a maior degradação térmica. A correlação entre densidade e resistência apresentou valores positivos para ambas as espécies, porém, significativo somente para a espécie *E. pellita* ($r=0,50$).

A correlação entre teor de umidade e resistência ao cisalhamento, os valores de r foram positivos e significativos para as duas espécies, onde $r = 0,60$ para *C. citriodora* e $r = 0,66$ para *E. pellita*. A resistência ao cisalhamento tende a aumentar com a redução do teor de umidade da madeira, de acordo com estudos realizados por Kretschmann e Green (1996). No entanto, nessa pesquisa foram encontrados resultados distintos, devido ao processo de modificação térmica. Com redução dos sítios higroscópicos da madeira, ocorre a diminuição do teor de umidade da madeira, porém esses sítios também são responsáveis pelas ligações adesivas. Assim, a decomposição desses dificulta a ligação da interface madeira adesivo, diminuindo assim a resistência ao cisalhamento (Carvalho *et al.*, 2015).

Caracterização dos adesivos

Os resultados da análise de teor de sólidos, viscosidade e densidade dos adesivos são apresentados na Tabela 3. Os resultados encontrados conferem com os valores fornecidos pelas fichas técnicas de cada adesivo. As propriedades dos adesivos são um fator importante na qualidade das juntas coladas. O adesivo RF, exibiu menores valores para a viscosidade e densidade que o adesivo PM. Adesivos com baixa viscosidade, possuem alta fluidez e favorecem a melhor absorção do adesivo pela madeira, podendo resultar numa linha de cola menos espessa (Bianche *et al.*, 2017). Ainda de acordo com os mesmos autores, alto teor de sólidos, pode contribuir para maior resistência na linha de cola.

Tabela 2 - Valores de correlação (r) da resistência ao cisalhamento com o tratamento térmico, densidade e teor de umidade das madeiras de *C. citriodora* e *E. pellita*

Madeira	Variáveis	Tratamento térmico	T.U (%)	Densidade	f _v (MPa)
<i>C. citriodora</i>	Tratamento	1,00	-0,84 *	-0,46 *	-0,71 *
	T.U (%)		1,00	0,45 *	0,60 *
	Densidade			1,00	0,57
<i>E. pellita</i>	f _v (MPa)				1,00
	Tratamento	1,00	-0,88 *	-0,25	-0,61 *
	T.U (%)		1,00	0,45 *	0,66 *
	Densidade			1,00	0,50 *
	f _v (MPa)				1,00

Nota: *significativo a 95% de confiança.

Tabela 3 - Teor de sólido, viscosidade e densidade dos adesivos Cascophen RS 216, e AGT 1315, à 25 °C

Adesivos	TS (%)	V (cP)	Densidade (g/cm ³)
Resorcinol Formaldeído (RF)	58	493,20	0,90
Poliuretano de mamona (PM)	97	586,57	1,04

Nota: TS (%): teor de sólidos; e V (cP): viscosidade.

Resistência ao cisalhamento na madeira sólida e das juntas coladas

A Tabela 4 apresenta os valores de F para o efeito do tipo de madeira, dos tratamentos térmicos e adesivos utilizados, assim como as interações, em que o efeito dos fatores principais e de algumas interações foram significativos.

Na Figura 1, observa-se que não houve distinção entre as resistências da madeira sólida controle, para ambas as madeiras, em que o *C. citriodora* teve resistência ao cisalhamento de 14,5 MPa, enquanto para o *E. pellita* a resistência foi 13,4 MPa. Com aumento da temperatura de modificação térmica houve redução da resistência ao cisalhamento da madeira sólida de ambas as espécies, sendo mais acentuada para madeira de *C. citriodora*. Tais resultados podem ser explicados pela fragilização da madeira ao ser tratada a altas temperaturas devido à degradação de componentes químicos, como a hemicelulose, resultando em uma perda de massa, e consequente redução da resistência da madeira (Carvalho *et al.*, 2015).

Para a madeira sólida de *C. citriodora*, a redução da resistência entre o controle e a temperatura de 160 °C foi mais intensa, do que o observado para o *E. pellita*. De forma geral, após a modificação térmica das madeiras, a resistência ao cisalhamento do *E. pellita* foi superior ao *C. citriodora*.

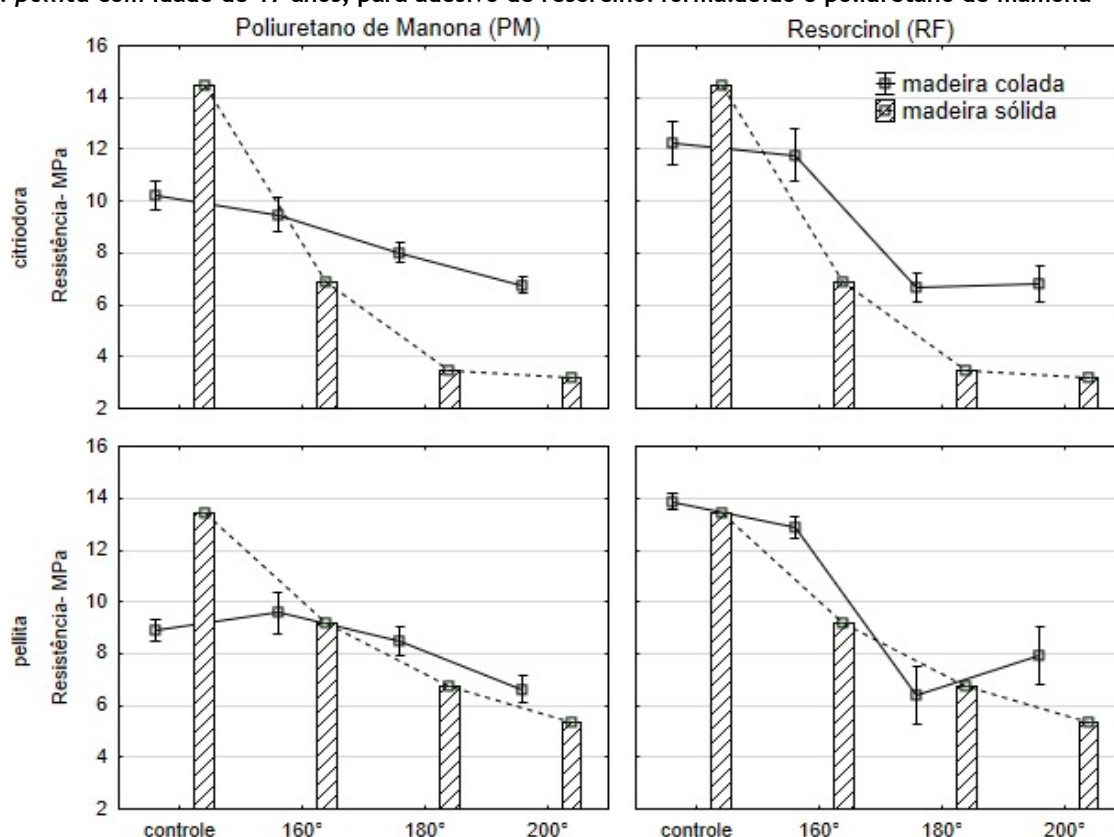
Analisando o efeito dos adesivos, observa-se que o RF obteve um melhor desempenho do que o PM para ambas as madeiras. Destacando o maior valor de resistência da madeira controle colada de *E. pellita*, não diferindo da resistência da madeira sólida na mesma condição. Valores de resistência para a madeira colada modificada termicamente são superiores aos da madeira sólida, o que indica que a penetração dos adesivos na madeira, estabiliza a região que pode ter sido enfraquecida devido a degradação dos constituintes da parede celular após o processo de modificação térmica.

Com o aumento da temperatura de modificação térmica, ocorre maior degradação dos constituintes da parede celular, além da degradação de substâncias extrativas que estão presentes no lúmen das células, essas modificações aliadas a possíveis micro rachaduras na madeira, proporcionam vias alternativas que aumentam a penetração dos adesivos (Bastani *et al.*, 2016).

No uso do adesivo PM, houve redução gradativa da resistência à medida que se aumenta a temperatura do tratamento das madeiras, havendo diferença de resistência entre as diferentes temperaturas dos tratamentos térmicos. Comparando a resistência da madeira colada com adesivo RF e PM, é observado que o adesivo PM apresenta redução de resistência menos intensa à medida que se aumenta a temperatura de tratamento e que o RF teve um desempenho superior para madeira controle (sem tratamento térmico), e aquela tratada a 160 °C, enquanto na temperatura de 180 °C, e 200 °C os adesivos obtiveram desempenhos similares.

Tabela 4 - Quadro de análise de variância com resultado da resistência ao cisalhamento da madeira colada em função do tipo de madeira, tratamentos e diferentes adesivos e suas interações

Fonte de variação	F	Valor p
Madeiras	4,06	0,0457*
Tratamentos	194,33	0,0000*
Adesivos	66,36	0,0000*
Madeiras*Tratamentos	0,56	0,6420
Madeiras *Adesivos	11,89	0,0007*
Tratamentos*Adesivos	51,81	0,0000*
Madeiras*Tratamentos*Adesivos	5,28	0,0017*

Figura 1 - Gráfico de resistência ao cisalhamento na madeira sólida e juntas coladas de *C. citriodora* e *E. pellita* com idade de 17 anos, para adesivo de resorcinol formaldeído e poliuretano de mamona

Madeiras coladas com o adesivo RF, apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento na junta colada nas amostras tratadas até 160 °C, ocorrendo uma redução acentuada da resistência acima desta temperatura, independente da madeira. Os autores Nunes *et al.* (2016), testando juntas coladas das mesmas espécies com resorcinol, encontraram valores semelhantes de resistência ao cisalhamento na linha de cola para a madeira não tratada, e tratada em 180 °C. Já para o tratamento de 200 °C, os valores de resistência encontrados por eles foram um pouco menores.

Os valores médios de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na madeira sólida, a resistência ao cisalhamento na linha de cola das juntas coladas e resistência relativa (c/s) * estão apresentados a seguir (Tabela 5). Nessa tabela, a resistência relativa apresentada foi calculada dividindo se os valores de resistência da madeira colada, em diferentes temperaturas e adesivos, pela resistência da madeira sólida não tratada termicamente.

Tabela 5 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na madeira sólida, na linha de cola das madeiras coladas, e a resistência relativa (c/s) * das espécies *C. citriodora* e *E. pellita*, para os diferentes tratamentos e adesivos

Madeiras	Tratamentos	Adesivos	<i>C. citriodora</i>				<i>E. pellita</i>			
			f_v (MPa)			Rr(C/S)*	f_v (MPa)			Rr(C/S)*
Colada	Controle	RF	12,2	b	B	0,84	13,9	a	A	1,04
		PM	10,2	c	B	0,70	8,9	bc	C	0,66
	160 °C	RF	11,8	b	B	0,81	12,8	a	A	0,96
		PM	9,5	c	D	0,66	9,6	bc	D	0,72
	180 °C	RF	6,7	d	E	0,55	6,4	d	E	0,48
		PM	8,0	e	E	0,47	8,5	c	E	0,63
	200 °C	RF	6,8	e	E	0,47	8,0	cd	E	0,60
		PM	6,8	e	E	0,46	6,6	d	E	0,49
Sólida	Controle	Sem adesivo	14,5	a	A	1,00	13,4	a	A	1,00

Nota: PM: poliuretano de mamona. RF: resorcinol formaldeído. Controle: não tratadas (testemunha). f_v : resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na madeira sólida, e na linha de cola nas juntas coladas. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna, e maiúsculas na linha não diferem entre si estatisticamente, à um nível de 95% de confiança. *resistência da madeira colada/sólida controle.

Não houve distinção entre as resistências na madeira sólida. A madeira de *E. pellita* respondeu melhor a colagem do que a outra, com ambos os adesivos. Percebe-se que à medida que aumenta a temperatura de modificação térmica, ocorre redução na resistência. Os mesmos sítios higroscópicos responsáveis pelo teor de umidade na madeira, os quais são degradados com o tratamento térmico, também são responsáveis pela interação química com o adesivo, resultando em menores valores de resistência (Carvalho *et al.*, 2015).

Comparando a madeira controle com a madeira tratada a 200 °C, com o uso do PM, houve uma redução da resistência aproximada de 52% (10,2 para 6,7) e 35% (8,9 para 6,6) para as espécies de *C. citriodora* e *E. pellita*, respectivamente, enquanto com o RF esta redução foi ainda maior, apresentando valores de 85% (12,6 para 6,8) e 74% (13,9 para 8,0). Bianche *et al.* (2017), ao ensaiar juntas coladas com poliuretano de mamona de madeira de *Eucalyptus sp.*, com densidade média de 0,67 g/cm³, encontraram valores de resistência de 9,26 MPa, valor este também semelhante ao obtido neste trabalho para a madeira não tratada termicamente.

A resistência relativa da madeira colada (c/s) *, da madeira de *E. pellita* controle para o adesivo RF, foi superior a 1, indicando que a colagem foi satisfatória para a resistência da madeira. Valor igual ou superior 1 indica que a resistência da madeira colada iguala ou supera a resistência da madeira sólida, situação ideal, pois será a madeira que irá definir a resistência na junta colada e não o adesivo. Para a madeira de *E. pellita* controle esse valor foi muito superior a encontrada com o PM (1,04; 0,66), respectivamente, mostrando que o RF oferece uma colagem mais satisfatória. A resistência da colagem do *C. citriodora*, não alcançou a resistência da madeira sólida, apresentando desempenho inferior ao *E. pellita*.

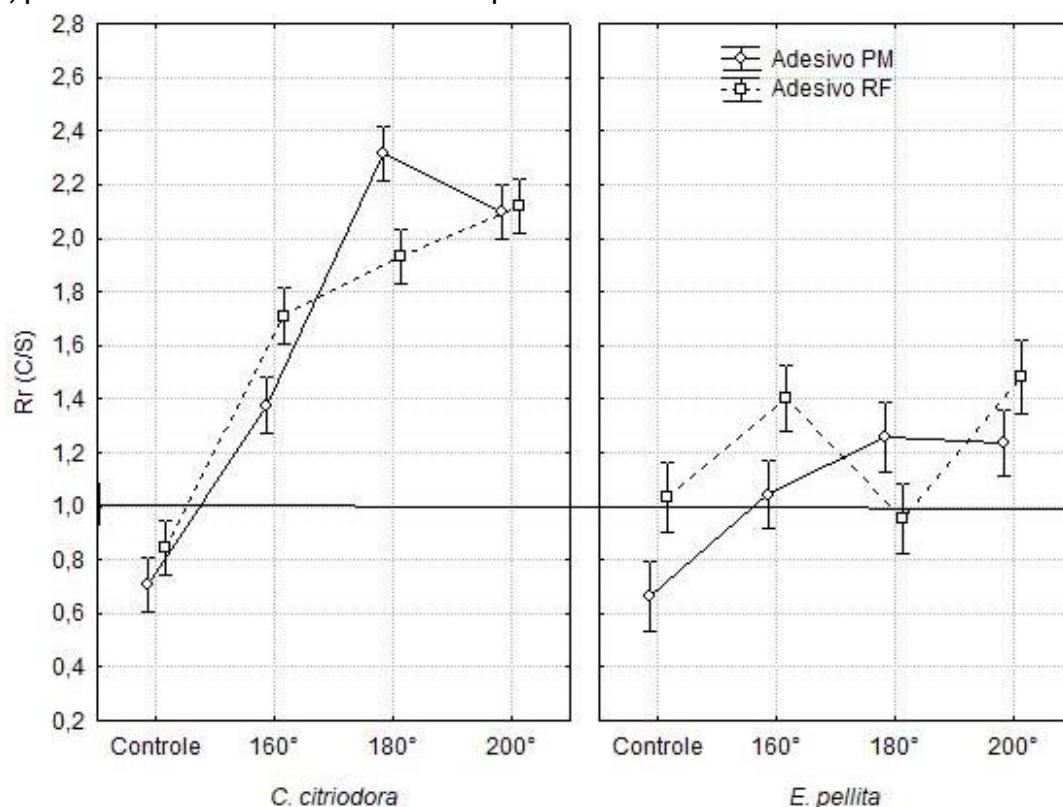
Na temperatura de 160 °C, o RF apresentou desempenho relativo igual 0,96 para *E. pellita*. Para essa madeira, as outras condições de tratamento resultaram em resistência relativa inferior a 80%. À medida que se aumentou a temperatura de tratamento térmico, as resistências relativas para a colagem de ambas as madeiras diminuíram.

Na Figura 2, é apresentando a resistência relativa da madeira colada (C/S), e que foram obtidos dividindo-se a resistência ao cisalhamento da madeira colada em tal temperatura de tratamento, pela resistência ao cisalhamento da madeira sólida na mesma temperatura de tratamento (*C. citriodora* e *E. pellita*).

A madeira de *C. citriodora* modificada termicamente com ambos os adesivos, apresentou valores de Rr muito superiores a 1, indicando uma maior redução da resistência da madeira sólida, após a modificação térmica naquela condição, o que elevou os valores relativos. Madeira de *E. pellita* não teve redução tão acentuada da resistência da madeira sólida após a modificação térmica.

O que se pode supor, para valores de Rr (C/S) maiores que 1, é que o adesivo aplicado gera um compósito madeira-adesivo, que fortalece a interface colada da madeira tratada termicamente, permitindo que os valores de Rr (C/S) sejam superiores a 1, uma vez que as madeiras coladas foram tratadas antes da aplicação do adesivo, e que o efeito da temperatura de tratamento será o mesmo.

Figura 2 - Gráfico de resistência relativa (C/S) da madeira *C. citriodora* e *E. pellita* com idade de 17 anos, para adesivo de resorcinol formaldeído e poliuretano de mamona



Madeira não tratada termicamente, controle, apresentou valores semelhantes a 1 apenas para madeira de *E. pellita* quando colada com adesivo RF, indicando colagem satisfatória. Para o adesivo PM na temperatura de 160 °C e RF na temperatura de 180 °C, os valores de resistência relativa foram semelhantes a 1, revelando uma boa adesão e pouca redução na resistência da madeira sólida.

Percentual de falha na madeira

Há um aumento da porcentagem de falha com o aumento da temperatura do tratamento térmico, independentemente do tipo de adesivo. O processo de modificação térmica acarreta a fragilização da madeira e da sua superfície (Tabela 6). Ferreira *et al.* (2022), analisando imagens de lâmina de madeira termorretificada identificou a degradação da superfície à medida que aumentou a temperatura de tratamento, com incremento de falha na madeira. Com a degradação das fibras na camada superficial, há uma redução da resistência natural na madeira, facilitando o descolamento das fibras e aumento da porcentagem de falhas.

Neste trabalho, o aumento de temperatura também resultou em decréscimo da densidade de ambas as madeiras, podendo ter resultado na maior penetração do adesivo, visto que a densidade é inversamente proporcional a porosidade. Ahmad *et al.* (2017), estudando a resistência de vigas de madeira com diferentes densidades, que as madeiras de densidade mais alta apresentaram apenas falha no adesivo, enquanto madeiras de densidades menores, apresentaram falhas na madeira.

Dependendo da temperatura de tratamento, há uma maior fragilização da madeira, podendo gerar uma falsa ideia de que a falha na madeira apenas é um bom indicador da colagem. Para tal é necessário também levar em consideração os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola e da densidade da madeira. A madeira de *E. pellita* tratada em 180 °C, e colada com RF, apresentou todas as juntas com cem por cento de falha, porém, quando comparado aos valores de resistência na Tabela 1, teve um baixo valor de resistência (6,4 MPa).

Comparando a madeira de *E. pellita* com *C. citriodora*, no controle, observa-se que para ambos os adesivos, o *E. pellita* exibiu maiores porcentagens de falha na madeira, esse comportamento se repetiu para todas as condições de tratamento, com exceção da colagem a 200 °C, com RF. Os autores Nunes *et al.* (2016) também encontraram os mesmos resultados para as mesmas espécies.

Tabela 6 - Porcentagem de falha na madeira das juntas coladas com os adesivos poliuretano vegetal de mamona e resorcinol, em função do tipo de tratamento, das espécies *C. citriodora* e *E. pellita*

Tratamento	Adesivo	<i>C. citriodora</i>	<i>E. pellita</i>
Controle	PM	19,9	69,8
	RF	60,8	96,5
160 °C	PM	28,4	62,1
	RF	91,5	94,3
180 °C	PM	68,1	92,6
	RF	96,4	100
200 °C	PM	71,7	88,5
	RF	98,3	97,1

Nota: PM: poliuretano vegetal de mamona. RF: resorcinol. Os valores em negrito não atingiram o mínimo aceitável de porcentagem de falha por grupo de 30% de acordo com a D5751-99 (ASTM, 2019). Os valores em negrito e sublinhados não atingiram o mínimo aceitável de 15% de porcentagem de falha por amostra de acordo com a D5751-99 (ASTM, 2019).

Para atingir aos parâmetros mínimos desejáveis para uma adesão satisfatória de acordo com a American Standards for Testing and Material (2019), D5751-99 (ASTM, 2019), um lote de amostras testadas de madeira de folhosadeve ter porcentagem de falha média não inferior a 30%, e individualmente, a porcentagem não pode ser inferior a 15%, e devendo se apresentar em pelo menos 90% dos casos e com nenhum valor igual a zero%.

Quando se discute o percentual de falha em relação ao tipo de adesivo, o PM gerou menores porcentagens de falha na madeira quando comparado com o resorcinol, comportamento semelhante foi observado por Segundinho *et al.* (2017), e isto pode ser devido à sua maior viscosidade e rápida reação de polimerização do PM, além de uma possível pré-polimerização do adesivo que contribui para valores de resistência menores (Bianche *et al.*, 2017). Estes mesmos autores avaliando qualidade de adesão de *Eucalyptus* sp com diferentes gramaturas de adesivo, encontrou menores porcentagens de falha na madeira para o resorcinol em relação ao poliuretano de mamona na condição seca.

Conclusão

O tratamento térmico reduziu a resistência da madeira colada quanto da sólida, devido a degradação da parede celular, indicada pela redução da perda de massa. Porém a aplicação do adesivo gera um reforço na interface madeira-adesivo, gerando maiores valores de resistência relativa C/S.

O adesivo resorcinol apresentou melhor desempenho geral em comparação ao poliuretano e a madeira de *E. pellite* teve uma menor degradação térmica quando comparado ao *C. citriodora* apresentando sempre maiores valores de percentual de falhas.

Resistência da madeira colada e tratada a 160 °C apresentou resultados equivalentes as amostras controle, para os ambos adesivos e madeiras.

Abaixo da temperatura de 180 °C, o resorcinol mostrou melhores resultados de resistência, enquanto acima desta temperatura, os dois adesivos se equivalem. A espécie *E. pellita* resultou em maiores valores de resistência devido a menor degradação térmica da madeira aliado à sua menor densidade aparente e que apresentou maiores valores de percentuais de falhas, indicando uma melhor penetração do adesivo na madeira.

Referências

AHMAD, Z. *et al.* Mechanical properties of finger jointed beams fabricated from eight Malaysian hardwood species. **Construction and Building: Materials**.v. 145, p 464-473, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **1417**: standard test methods for rubber latices—synthetic. Philadelphia, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D143**: standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2395**: standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. Philadelphia, 2017.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5266-13**: standard practice for estimating the percentage of wood failure in adhesive bonded joints. Philadelphia, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5751-99**: standard specification for adhesives used for laminate joints in nonstructural lumber products. Philadelphia, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D905-08**: standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Philadelphia, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D1200**: standard test method for viscosity by ford viscosity cup. Philadelphia, 2018.
- BASTANI, A. *et al.* Study of adhesive bondlines in modified wood with fluorescence microscopy and X-ray micro-computed tomography. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. v. 68, p. 351-358, 2016.
- BASTANI, A.; ADAMOPOULOS, S.; MILITZ, H. Effect of open assembly time and equilibrium moisture content on the penetration of polyurethane adhesive into thermally modified wood. **The Journal of Adhesion**, v. 93, p. 575-583, 2017.
- BIANCHE, J. J. *et al.* Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 3, 2017.
- BIANCHE, J. J. *et al.* Improving the understanding of wood bonding: behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 112, p. 102987-102987, 2022.
- CARVALHO, A. G. *et al.* Colagem da Madeira de Pinus termorretrificada. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 217-222, 2015.
- CHEN, Y.-H.; WU, C.-H.; CHEN, Y.-C. Optimized condition for eco-friendly wood composites manufactured from castor oil-based polyurethane. **Construction and Building Materials**. v. 306, 124789, 2021.
- CHINIFORUSH, A. A. *et al.* Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. **Construction and Building Materials**. v. 207, p. 70-83, 2019.
- FARIA, D.L. *et al.* Studying the grammage in lvl panels glued with castor oil-based polyurethane adhesive: a possible alternative to formaldehyde releasing adhesives. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 140-149, 2020.
- FERREIRA, B. S. *et al.* Physical and Mechanical Properties of Plywood Produced with Thermally Treated *Pinus taeda* Veneers. **Forests**, v. 13, n. 9, p. 1398, 2022.
- FERREIRA, B. S.; SILVA, J. V. F.; CAMPOS, C. I. Static bending strength of heat-treated and chromated copper arsenate-treated plywood. **BioResources**, v. 12, 6276-6282, 2017.
- GURUNATHAN, T. *et al.* Polyurethane conductive blends and composites: synthesis and applications perspective. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 1, p. 67-80, 2013.
- HILL, C. A. S. **Wood modification**: chemical, thermal and other processes. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.
- KRETSCHMANN, D. E.; GREEN, D. W. Modeling moisture content-mechanical property relationships for clear southern pine. **Wood and Fiber Science**. v. 28, n. 3, p. 320-337, 1996.
- KUBOVSKÝ, I. K.; CÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F. Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. **Polymers**, v. 485, n. 12, 2020.
- MEDEIROS, D. T. *et al.* Physical-mechanical alterations in *Qualea paraensis* wood after heat treatment. **Madera y Bosques**, v. 27, n. 2, 2022.
- MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade de madeira para a Amazônia brasileira. In: ANAIS DO CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, São Paulo, 1990. **Anais [...]** São Paulo, 1990.
- NOGUEIRA, R. S. *et al.* Performance of one component polyurethane (1C-PUR) adhesives in the production of finger joints fabricated from four planted forest species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 80, 1421-1431, 2022.

- NUNES, C. S. *et al.* Qualidade de adesão das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* tratadas termicamente. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 41–56, 2016.
- OLIVEIRA, R. G. E. *et al.* Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* glulam. **Maderas-ciencia Y Tecnologia**, v. 22, n. 4, p. 495–504, 2020.
- SAFIN, R. R. *et al.* Increasing the strength of the glue line in the production of thermally modified wood paneling. **Coatings**, v. 11, n. 253, 2021.
- SANTIAGO, S. B. *et al.* Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.
- SAWPAN, M. A. Polyurethanes from vegetable oils and applications: a review. **Journal of Polymer Research**, v. 25, n. 8, 2018.
- SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Matéria**, v. 26, n. 3, 2021.
- SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Matéria**, v. 22, n. 2, 2017.
- SHIRMOHAMMADLI, Y. *et al.* One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: a review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 123, 103358, 2023.
- SUGAHARA, E. *et al.* Comparative study of plywood boards produced with castor oil-based polyurethane and phenol-formaldehyde using *Pinus taeda* L. veneers treated with chromated copper arsenate. **Forests**, v. 13, n. 7, p. 1144–1144, 2022.

Caterina Carvalhal Buratta

Conceitualização, Curadoria de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação dos dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Produtos Florestais | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Km 07, Zona Rural, BR-465 | Seropédica - RJ - Brasil | CEP 23890-000 | Tel.: (21) 98491-7554 | E-mail: cburatta@gmail.com

Alexandre Miguel do Nascimento

Conceitualização, Análise dos dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação dos dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Produtos Florestais | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Tel.: (21) 99241-0771 | E-mail: alexmnasci@gmail.com

Jaqueline Rocha de Medeiros

Conceitualização, Design da apresentação dos dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Produtos Florestais | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Tej.: (83) 99905-7152 | E-mail: jaquelinerocha256@gmail.com

Natália Dias de Souza

Conceitualização, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Redação - revisão e edição.

Departamento de Produtos Florestais | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Tel.: (21) 98230-4207 | E-mail: natdias@hotmail.com

Roberto Carlos Costa Lelis

Conceitualização, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Redação - revisão e edição.

Departamento de Produtos Florestais | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro | Tel.: (21) 99956-6562 | E-mail: lelis@ufrj.br

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros** e **Julio Molina**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.