









Caracterização tecnológica da madeira de duas espécies de *Eucalyptus* submetidas a tratamento hidrotérmico e congelamento

Maiara Talgatti¹, Amanda Grassmann da Silveira¹, Talita Baldin², Elio José Santini¹, Nadia Helena Bianchini^{1*}, Lilian Gonçalves Mariano¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Ciências Florestais, Avenida Roraima nº 1000, Cidade Universitária, Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil

²Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Avenida Universitária, CEP 39404-547, Montes Claros, MG, Brasil

*Autor correspondente:
nhbianchini@gmail.com

Termos para indexação:

Propriedade da madeira
Tratamento térmico
Coloração da madeira

Index terms:

Wood properties
Heat treatment
Wood color

Histórico do artigo:

Recebido em 14/08/2019
Aprovado em 03/09/2021
Publicado em 21/12/2021

Resumo - O presente estudo objetivou avaliar possíveis alterações nas propriedades das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* e *E. grandis* modificadas termicamente sob condições hidrotérmicas e de congelamento. Foram amostradas cinco árvores de cada espécie com 20 anos de idade, sendo retirada de cada árvore a primeira tora de 3 m. Foram confeccionados 12 corpos de prova próximos à casca e 12 próximos à medula para cada espécie, com dimensões de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm, totalizando 48 corpos de prova. Foram realizados os ensaios de flexão dinâmica, colorimetria e espectroscopia no infravermelho por reflectância total atenuada. Os métodos de tratamento térmico empregados não prejudicaram as propriedades mecânicas da madeira e não afetaram as suas massas específicas aparentes. O tratamento de aquecimento em água implicou em maiores variações das propriedades químicas da madeira. Essas variações, possivelmente, contribuíram para as mudanças de cor na madeira.

Technological characterization of wood from two species of *Eucalyptus* submitted to hydrothermal and freezing treatment

Abstract - The present study aimed to evaluate the modifications of the properties of *Eucalyptus cloeziana* and *E. grandis* wood modified under hydrothermal conditions and freezing. Five trees for each species with 20 years old were sampled, and the first 3 m log was sampled from each tree. For each species, 24 specimens of dimensions 2.0 x 2.0 x 30.0 cm were prepared near the bark and close to the pith, totaling 48 specimens. Testes of dynamic flexion, colorimetry and infrared spectroscopy by attenuated total reflectance were performed. The heat treatment methods employed did not impair the mechanical properties of the wood and did not affect their apparent specific mass. The heat treatment in water implied in greater variations of the chemical properties. Possibly, these variation contributed to the color change of the wood.



Introdução

No Brasil, a maior parte dos plantios florestais são realizados com espécies do gênero *Eucalyptus* (IBÁ, 2020), com destaque para *E. grandis* e, em menor escala, *E. cloeziana*. Estas espécies apresentam madeira de coloração mais clara (Garcia et al., 2014), o que dificulta a sua inserção em alguns mercados, como aqueles voltados para decoração, que exigem o aspecto estético do material.

O emprego de tratamentos térmicos na madeira visa diminuir a ocorrência de defeitos e reduzir o tempo de secagem (Talgatti et al., 2016). São também vistos como alternativas para o beneficiamento de características tecnológicas da madeira, devido às alterações provocadas nos seus constituintes (Juízo et al., 2018).

Cademartori et al. (2014) ressaltam as mudanças nas propriedades físicas, mecânicas e químicas da madeira relacionadas com o tipo de tratamento térmico utilizado. Ainda, de acordo com Zanuncio et al. (2014), o processo de termorreificação pode alterar a cor da madeira de *Eucalyptus*, fazendo com que ela se assemelhe às madeiras de maior valor de mercado.

O tratamento térmico úmido, processo que consiste na pré-hidrólise ou processo hidrotérmico, é um tratamento utilizado pela indústria para degradar as hemiceluloses da madeira (Li et al., 2010). O congelamento é empregado para minimizar defeitos relacionados à secagem de madeira, onde a água e os extrativos presentes na parede celular passam para o lúmen, aumentando a rigidez da célula (Ilic, 1995).

Apesar da importância das duas espécies, faltam informações sobre o efeito dos tratamentos térmicos mencionados nas propriedades das madeiras avaliadas neste trabalho. Diante do exposto, o presente estudo objetivou avaliar as alterações nas propriedades das madeiras de *E. cloeziana* e *E. grandis* modificadas termicamente sob as condições hidrotérmicas e de congelamento.

Material e métodos

Amostragem e tratamentos térmicos

Foram amostradas dez árvores, com 20 anos de idade, sendo cinco de *Eucalyptus grandis* e cinco de *E. cloeziana*, de um povoamento localizado no município

de Santa Maria, RS (29°43'04''S, 53°43'35'' W e 138 m de altitude). A área apresenta precipitação pluviométrica anual estimada em 1.769 mm e temperatura média anual de 22 °C. O solo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico, de textura média e relevo ondulado à suave ondulado, pertence à Unidade de Mapeamento São Pedro (Streck et al., 2008).

De cada árvore abatida, foi utilizada a primeira tora com 3 m de comprimento. As toras foram encaminhadas para a serraria do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) da Universidade Federal de Santa Maria, e desdobradas em pranchões centrais de 8 cm de espessura. Em seguida, para cada espécie, foram confeccionados corpos de prova próximos à casca e próximos à medula, com dimensões de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997). Estes corpos de prova foram utilizados nos ensaios de flexão dinâmica, determinação da massa específica aparente, colorimetria e análise de espectroscopia no infravermelho por reflectância total atenuada (ATR-IR), totalizando 48 corpos de prova, sendo 24 amostras para cada espécie.

As amostras de madeira foram submetidas aos tratamentos de imersão em água quente (85 °C) e congelamento (-18 °C). No tratamento de imersão em água quente, as amostras foram acondicionadas em um tanque térmico com controle termostático de temperatura, que conserva a temperatura da água a 85 °C, enquanto que no tratamento térmico de congelamento as amostras foram acondicionadas em freezer. Ambos os tratamentos foram realizados no laboratório LPF e tiveram uma duração de 24 h. Foi utilizado delineamento experimental em arranjo bifatorial 3 x 2, sendo os três tratamentos: aquecimento, congelamento e controle, e as duas posições: cerne e alburno, para cada espécie avaliada (*E. cloeziana* e *E. grandis*), constituindo assim 6 tratamentos de quatro repetições para cada espécie.

A seguir, os corpos de prova foram transferidos para uma câmara climatizada (temperatura de 20 °C e umidade relativa de 65%), até estabilizarem a umidade de equilíbrio em aproximadamente 12%.

Determinação da massa específica aparente

Após o período que as amostras permaneceram em câmara climatizada e a estabilização da massa, calculou-se a massa específica aparente (g cm^{-3}). Utilizou-se o método direto, por meio da razão entre o volume (cm^3) e a massa do corpo de prova (g), ambos a 12% de umidade.

Flexão dinâmica

O ensaio de flexão dinâmica foi realizado no pêndulo de Charpy. Os dados obtidos foram convertidos de Joule para kgf, utilizando a relação 1 Joule = 0,101972 kgf. Em seguida, de acordo com a *L'A Association Francaise de Normalization* (AFN, 1942), estimou-se o coeficiente de resiliência (K) e a cota dinâmica (CD), para fins de comparação com outros estudos.

Ensaio colorimétrico

Para cada espécie foram realizadas verificações colorimétricas nas quatro faces de cada amostra, sendo duas repetições cada, totalizando oito verificações por corpo de prova. Foram determinados os seguintes parâmetros colorimétricos: da claridade L^* (preto, 0 – branco, 100), da coordenada cromática a^* (+ vermelho, - verde), da coordenada cromática b^* (+ amarelo, - azul), da saturação de cor C^* e do ângulo de tinta h^0 . A variação de cor ΔE foi avaliada de acordo com a Equação 1, para os corpos de prova tratados termicamente em relação aos de referência.

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

Onde: ΔE - variação de cor; ΔL^* - variação dos parâmetros de claridade; Δa^* - variação da coordenada cromática vermelho – verde; Δb^* - variação da coordenada cromática amarelo – azul.

Espectroscopia no infravermelho

Para a análise de espectroscopia no infravermelho por reflectância total atenuada (ATR-IR), os corpos de prova utilizados no ensaio colorimétrico foram reduzidos a pequenos palitos, homogeneizados e pulverizados em moinho de facas tipo Willey. Utilizou-se peneiras vibratórias para classificar separadamente o resíduo de cada tratamento. Desta forma, selecionou-se o material que ficou retido na peneira de 60 *mesh* para os testes.

A análise foi realizada em espectrofotômetro Nicolet Nexus 470, onde realizou-se 32 varreduras em transmitância, com leituras entre 4000 e 700 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} . Foi feito o alinhamento da lâmpada do equipamento para cada teste e coletou-se os espectros de fundo. A técnica foi utilizada para avaliar

qualitativamente as madeiras de *E. cloeziana* e *E. grandis* modificadas termicamente sob condições hidrotérmicas e de congelamento, por meio da identificação das bandas e das possíveis alterações em bandas características da madeira.

A banda de lignina (1.510 cm^{-1}) foi analisada em relação à intensidade das bandas de celulose (899 cm^{-1}), hemicelulose (1.375 cm^{-1}) e carbonila (1.736 cm^{-1}), uma vez que esta banda de lignina não sofre interferência de outros compostos (Costa et al., 2011).

Análise estatística

Os dados das propriedades das madeiras foram avaliados com o auxílio do *software* estatístico *Genes*. Havendo interação significativa entre os fatores, as médias foram comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). Onde não houve interação significativa entre os fatores, as médias dos tratamentos de cada fator foram avaliadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados

Massa específica aparente e flexão dinâmica

Os resultados dos ensaios de flexão dinâmica e a massa específica aparente das madeiras tratadas em diferentes posições de *Eucalyptus cloeziana* e *E. grandis* estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Observa-se que não houve interação entre os fatores, o que indica que os métodos de tratamento térmico empregados neste estudo não prejudicaram as propriedades mecânicas das madeiras e não interferiram nas suas massas específicas aparentes.

As madeiras de ambas as espécies não apresentaram mudança na resistência ao impacto. Os valores de trabalho absorvido (W) observados para este estudo estão no intervalo de 2,17- 2,54 kgm para *E. cloeziana* e de 1,11-2,35 kgm para *E. grandis*.

Os valores observados de coeficiente de resiliência para *E. cloeziana* (Tabela 1) foram de 0,75 Kgf cm^{-2} (cerne) e 0,87 Kgf cm^{-2} (alburno), enquanto que para *E. grandis* (Tabela 2) os valores encontrados foram 0,42 Kgf cm^{-2} (cerne) e 0,75 Kgf cm^{-2} (alburno).

Tabela 1. Valores médios do trabalho absorvido (W), coeficiente de resiliência (K), cota dinâmica (CD), resistência ao impacto (fbw) e massa específica aparente a 12% para amostras de madeiras de *Eucalyptus cloeziana* tratadas em diferentes posições.

Table 1. Mean values of the absorbed work (W), coefficient of resilience (K), dynamic dimension (DC), impact strength (fbw) and apparent specific mass at 12% for *Eucalyptus cloeziana* wood samples treated in different positions.

Tratamento	Aquecimento	Congelamento	Controle	Média
----- fbw (Kj m ²)* -----				
Cerne	60,80	58,12	58,74	58,89 b
Alburno	67,50	68,01	67,83	67,78 a
Média	65,30 A	62,03 A	63,29 A	
----- W (Kj m ²)* -----				
Cerne	2,30	2,17	2,22	2,22 b
Alburno	2,54	2,54	2,53	2,54 a
Média	2,47 A	2,32 A	2,38 A	
----- K (Kgf cm ⁻²)* -----				
Cerne	0,78	0,74	0,76	0,75 b
Alburno	0,87	0,88	0,87	0,87 a
Média	0,84 A	0,80 A	0,81 A	
----- Me (g cm ⁻³)* -----				
Cerne	1,25	1,20	1,17	1,20 a
Alburno	1,14	1,21	1,15	1,17 a
Média	1,19 A	1,20 A	1,16 A	
----- CD* -----				
Cerne	0,78	0,78	0,80	0,79 b
Alburno	0,88	0,85	0,87	0,86 a
Média	0,84 A	0,83 A	0,81 A	

Onde: * = não houve interação significativa entre os fatores. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Tabela 2. Valores médios do trabalho absorvido (W), coeficiente de resiliência (K), cota dinâmica (CD), resistência ao impacto (fbw) e massa específica aparente a 12% para amostras de madeiras de *Eucalyptus grandis* tratadas em diferentes posições.

Table 2. Mean values of the absorbed work (W), coefficient of resilience (K), dynamic dimension (DC), impact strength (fbw) and apparent specific mass at 12% for *Eucalyptus grandis* wood samples treated in different position

Tratamento	Aquecimento	Congelamento	Controle	Média
----- fbw (Kj m ²)* -----				
Cerne	31,59	28,30	35,95	31,95 b
Alburno	57,50	59,64	54,79	57,31 a
Média	44,55 A	43,97 A	45,37 A	
----- W (Kj m ²)* -----				
Cerne	1,28	1,11	1,41	1,27 b
Alburno	2,44	2,35	2,17	2,32 a
Média	1,86 A	1,73 A	1,79 A	
----- K (Kgf cm ⁻²)* -----				
Cerne	0,42	0,36	0,47	0,42 b
Alburno	0,77	0,78	0,72	0,75 a
Média	0,79 A	0,57 A	0,59 A	
----- CD* -----				
Cerne	1,69	1,33	1,73	1,58 a
Alburno	1,84	2,07	1,59	1,83 a
Média	1,76 A	1,70 A	1,66 A	
----- Me (g cm ⁻³)* -----				
Cerne	0,49	0,52	0,52	0,51 b
Alburno	0,64	0,61	0,67	0,64 a
Média	0,57 A	0,57 A	0,60 A	

Onde: * = não houve interação significativa entre os fatores. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Colorimetria

Na Tabela 3 verificam-se as comparações múltiplas das médias dos parâmetros colorimétricos da claridade L^* (preto, 0 – branco, 100), da coordenada cromática a^* (+vermelho, - verde), da coordenada cromática b^* (+ amarelo, - azul), da saturação de cor C^* e do ângulo de tinta h° para as madeiras de *E. cloeziana* submetidas aos tratamentos térmicos e controle. Os valores médios de L^* apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, sendo verificados os maiores valores para a madeira de cerne do tratamento controle e do alburno para o tratamento de congelamento, que apresentou as madeiras mais claras neste estudo.

Observou-se que ambos os tratamentos térmicos diminuíram a luminosidade, resultando no escurecimento das madeiras, com exceção da madeira de alburno no aquecimento em água (Figura 1C), que teve um aumento na luminosidade da madeira em relação ao tratamento controle (Figura 1A).

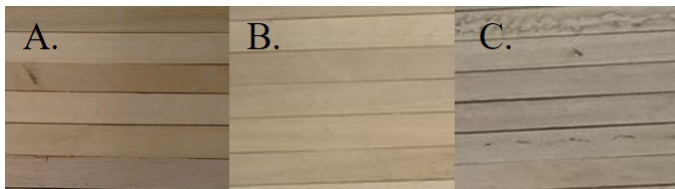


Figura 1. Aparência natural da madeira de *Eucalyptus cloeziana* e após tratamentos térmicos, A = controle, B = tratamento de congelamento, C= tratamento de aquecimento em água.

Figure 1. Natural appearance of *Eucalyptus cloeziana* wood and after heat treatments, A = control, B = freezing treatment, C = heating treatment in water.

A coordenada a^* (vermelho) apresentou valores diferentes para todos os tratamentos, sendo os maiores valores aferidos para o alburno no tratamento de congelamento, seguidos dos demais. Com relação ao parâmetro C^* (saturação da cor), que é diretamente relacionado às coordenadas cromáticas a^* e b^* , não houve diferença estatística entre tratamentos e posições da madeira.

Os valores da matriz amarelo (b^*) apresentaram diferença estatística e os maiores valores foram observados no cerne e no alburno das madeiras submetidas ao tratamento de aquecimento em água.

Ainda, observando-se o parâmetro h° (ângulo de tinta), verificou-se que essa madeira se localiza mais próxima ao eixo amarelo, contribuindo para explicar a cor da madeira de *E. cloeziana* (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros colorimétricos das amostras de madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Table 3. Colorimetric parameters of the *Eucalyptus cloeziana* wood samples.

Treatments	Heating	Freezing	Control
----- L -----			
Cerne	67,68 bB	71,00 aA	72,58 aA
Alburno	70,26 aA	66,92 bB	68,75 bA
----- a -----			
Cerne	4,25 aB	7,32 bA	7,06 aA
Alburno	4,04 aC	8,09 aA	7,47 aB
----- C -----			
Cerne	18,81 aB	23,25 aA	22,22 aA
Alburno	18,42 aB	23,76 aA	22,78 aA
----- b -----			
Cerne	18,32 aB	22,06 aA	14,27 bC
Alburno	17,97 aB	22,33 aA	21,50 aA
----- h ⁰ -----			
Cerne	76,92 aA	71,71 aB	71,48 aB
Alburno	77,34 aA	70,07 bB	70,96 aB

Onde: L^* = claridade; a^* e b^* = coordenadas cromáticas; C^* = saturação; h° = ângulo de tinta. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t ($p \geq 0,05$).

Na Tabela 4 verificam-se as comparações múltiplas das médias dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* , C^* e h° para as madeiras de *E. grandis* submetidas aos tratamentos térmicos e controle. Assim como para *E. cloeziana*, os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas e os maiores valores de L^* foram verificados para o cerne do tratamento controle e o cerne do congelamento. Em geral, as madeiras apresentaram redução da luminosidade, principalmente com relação ao alburno no aquecimento em água (Figura 2C), o qual apresentou considerável redução da luminosidade em relação ao tratamento controle (Figura 2A), tornando a madeira mais escura.



Figura 2. Aparência natural da madeira de *Eucalyptus grandis* e após tratamentos térmicos, A = controle, B = tratamento de congelamento, C = tratamento de aquecimento em água.

Figure 2. Natural appearance of *Eucalyptus grandis* wood and after heat treatments, A = control, B = freezing treatment, C = heating treatment in water.

A matriz vermelha (a^*) variou entre 9,07 e 15,09 nas amostras de madeira de *E. grandis*, apresentando diferenças estatísticas entre os tratamentos e as posições da madeira (cerne e alburno). Observou-se que houve uma diminuição dos valores em relação ao controle no tratamento de aquecimento em água para ambas as posições, e no congelamento para o cerne.

Quanto aos valores de C^* , houve diferenças estatísticas entre os tratamentos e as posições da madeira. Para ambas as posições submetidas ao aquecimento, os valores de C^* diminuíram em relação ao tratamento controle, seguindo a tendência verificada para a madeira de *E. cloeziana*.

A madeira de cerne apresentou maior tonalidade amarela (b^*) em relação ao alburno, independente do tratamento aplicado. Verificou-se que o parâmetro h^0 se localiza mais próximo do eixo vermelho, contribuindo para explicar a cor da madeira de *E. grandis*.

Tabela 4. Parâmetros colorimétricos das amostras de *Eucalyptus grandis*.

Table 4. Colorimetric parameters of *Eucalyptus grandis* samples.

Tratamento	Aquecimento	Congelamento	Controle
----- L -----			
Cerne	61,55 aB	69,52 aA	68,99 aA
Alburno	53,48 bC	60,67 bB	64,71 bA
----- a -----			
Cerne	9,07 bB	11,63 bA	12,33 aA
Alburno	10,92 aC	15,09 aA	12,88 aB
----- C -----			
Cerne	17,89 aB	22,24 aA	22,82 aA
Alburno	18,86 aB	22,40 aA	21,61 bA
----- b -----			
Cerne	20,07 bB	25,15 bA	26,00 aA
Alburno	21,81 aC	27,08 aA	25,19 bB
----- h ⁰ -----			
Cerne	63,12 aA	62,40 aA	61,87 aA
Alburno	60,03 bA	56,26 bB	59,30 bA

Onde: L* = claridade; a* e b* = coordenadas cromáticas; C = saturação; h⁰* = ângulo de tinta. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t ($p \geq 0,05$).

Espectroscopia no infravermelho

Os espectros resultantes das análises de espectroscopia no infravermelho por reflectância total atenuada (ATR-IR) para as madeiras de *E. cloeziana* e de *E. grandis* podem ser observados na Figura 3. Os espectros demonstram os resultados dos tratamentos e como ocorrem as variações de intensidades dos compostos da parede celular em relação às bandas. Eles estão entre 1.800 e 800 cm^{-1} região que corresponde à identidade da madeira. As madeiras das duas espécies apresentaram comportamentos semelhantes quanto à modificação dos picos referentes aos componentes químicos, em função da termoretificação realizada.

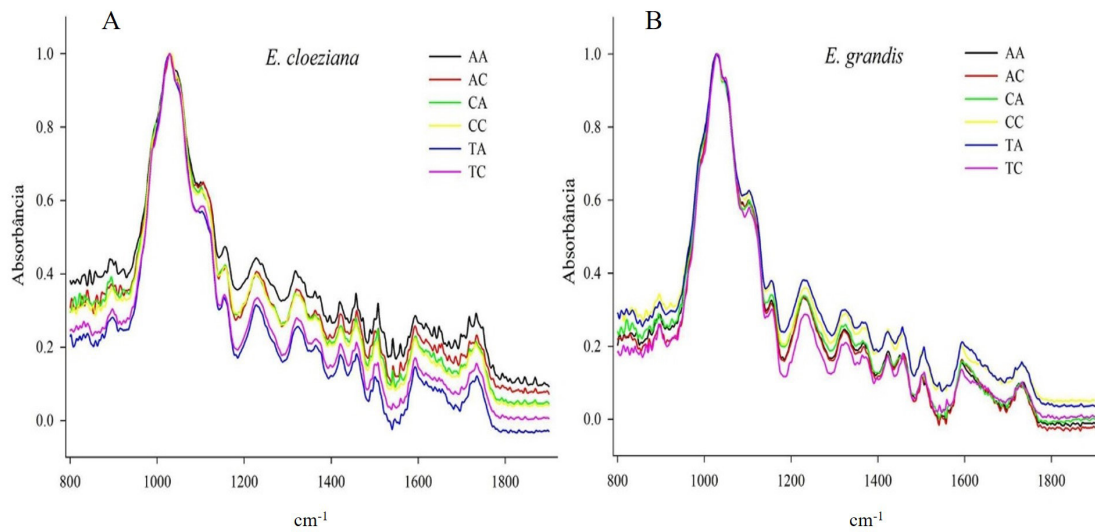


Figura 3. Espectros no infravermelho por reflectância total atenuada das amostras de madeira de *Eucalyptus cloeziana* (A) e *Eucalyptus grandis* (B), submetidas aos tratamentos térmicos de congelamento e de termorretificação. AA: aquecimento alburno; AC: aquecimento cerne; CA: congelamento alburno; CC: congelamento cerne; TA: controle alburno; TC: controle cerne.

Figure 3. Infrared spectra by attenuated total reflectance of wood samples of *Eucalyptus cloeziana* (A) and *Eucalyptus grandis* (B), subjected to freezing and thermortification treatments. AA: sapwood heating; AC: core warming; CA: freezing sapwood; CC: freezing heartwood; TA: sapwood control; TC: heartwood control.

Houve um aumento no pico 1.736 cm^{-1} relacionado à presença dos grupos acetil na madeira de *E. cloeziana* (Figura 3A) após o tratamento de aquecimento em água. Em *E. grandis* (Figura 3B) ocorreu um decréscimo neste pico nas amostras tratadas com aquecimento ou congeladas. O pico 1.510 cm^{-1} , característico da lignina, teve sua intensidade aumentada em todos os tratamentos térmicos, especialmente no aquecimento em água da madeira de alburno de *E. cloeziana*.

A banda localizada em 1.375 cm^{-1} está associada a deformações angulares C-H na celulose e na hemicelulose, onde foi verificado o incremento do pico para *E. cloeziana* (Figura 3A) tratado hidrotérmicamente e para *E. grandis* (Figura 3B) no tratamento de congelamento de madeira de cerne.

Discussão

Os resultados para massa específica aparente e flexão dinâmica encontrados neste estudo estão de acordo com Calonego et al. (2012), que também não identificaram

redução da massa específica básica para a madeira de *Eucalyptus grandis*, utilizando diferentes temperaturas para termorretificação. Porém, os valores se mostraram insignificantes e sem tendência em função da temperatura de tratamento. O que pode ser visualizado é que as posições (cerne e alburno) foram fatores relevantes nas variações de resistência ao impacto, trabalho absorvido e coeficiente de resiliência, onde para as espécies em estudo, o alburno se destacou com maiores valores (Tabelas 1 e 2). Essa tendência não foi observada para a variável cota dinâmica.

Com relação à resistência ao impacto, as amostras de madeira de ambas as espécies não apresentaram mudanças, com valores nos diferentes tratamentos dentro do intervalo esperado para as espécies do gênero *Eucalyptus* (Tabelas 1 e 2). Resultados semelhantes também foram observados por Pertuzzatti et al. (2017), que avaliaram a resistência da madeira de *E. grandis* e *E. cloeziana* submetidas a diferentes condições de umidade a impactos.

Os valores de trabalho absorvido pelas amostras de madeira de *E. cloeziana* e de *E. grandis* (Tabelas 1 e 2), são inferiores ao de outras espécies usadas para o mesmo fim. Beltrame et al. (2012) encontraram valores para noqueira-pecã de 2,90 kgm, valor superior aos verificados para este estudo, demonstrando menor absorção da força aplicada sobre as madeiras quando submetidas a grandes impactos e vibrações. De acordo com esses autores, quando há um aumento no trabalho absorvido, a madeira é capaz de absorver e dissipar as cargas submetidas. Pertuzzatti et al. (2017) relataram que amostras de *E. cloeziana* apresentaram maior capacidade de absorver e dissipar as cargas de choque que as de *E. grandis*.

Os valores observados de coeficiente de resiliência em ambas as espécies em estudo (Tabelas 1 e 2) são superiores aos verificados por Talgatti et al. (2017). Esses autores observaram a influência da massa específica de *Hovenia dulcis* nas suas propriedades mecânicas. Beltrame et al. (2010) afirmam que, para uma madeira ser considerada resiliente, ou seja, com alta resistência ao impacto, o valor de cota dinâmica deve ser superior a 1,2, sendo esta definida como a capacidade do material em suportar impacto. Considerando os valores encontrados neste estudo, para ambas as espécies estudadas, pode-se afirmar que tanto as madeiras tratadas quanto àquelas não tratadas podem ser consideradas resilientes.

Os resultados encontrados para colorimetria evidenciaram que ambos os tratamentos térmicos diminuíram a luminosidade, resultando no escurecimento das madeiras, com exceção da madeira de alburno no aquecimento em água, que teve um aumento na luminosidade da madeira em relação ao tratamento controle (Figuras 1 e 2 e Tabelas 3 e 4). Cademartori et al. (2014) e Silva et al. (2015) relataram que os decréscimos da claridade (L^*) estão relacionados com a variação do conteúdo de extrativos na madeira, ocorridos durante a termorretificação e a degradação de hemiceluloses. Lima et al. (2013) ressaltam que, uma vez que todos os valores de L^* foram superiores a 56, estes podem ser classificados como de cores claras.

De acordo com os resultados encontrados para coordenada a^* (vermelho) (Tabelas 3 e 4), pode-se inferir que o congelamento fez com que o pigmento vermelho se sobressaísse em relação aos demais para as madeiras de alburnos. Segundo Chen et al. (2012), o aumento de a^* pode ser ocasionado pela condensação e/ou oxidação

de extrativos presentes na madeira, os quais absorvem a luz vermelha, tornando a madeira mais avermelhada.

No entanto, não houve diferença estatística entre os tratamentos e posições da madeira para a variável C^* , referente à saturação da cor. Para Mattos et al. (2014), este parâmetro está relacionado à pureza da cor em comparação ao branco, sendo que a redução da C^* designa uma opacidade da cor, situação que não foi verificada neste estudo.

Os maiores valores da matriz amarelo (b^*) foram observados no cerne e no alburno das madeiras submetidas ao tratamento de aquecimento em água (Tabelas 3 e 4). De acordo com Gunduz et al. (2010), a elevação da variável cromática b^* está relacionada com a degradação das hemiceluloses e a elevação de açúcares, que possuem baixo peso molecular, elaborados durante a degradação térmica, o que causa a elevação dos tons de azul.

Para a matriz vermelha (a^*), observou-se que houve uma diminuição dos valores em relação ao tratamento controle, quando comparado ao tratamento de aquecimento em água para ambas as posições, e no congelamento para o cerne. Este comportamento também foi observado por Moura & Brito (2011) em estudos de termorretificação da madeira de *E. grandis*, que supõem que a redução na variável a^* está associada, provavelmente, à volatilização de alguns compostos fenólicos, que conferem a cor vermelha à madeira do eucalipto quando a mesma é aquecida. Porém, para a madeira de alburno, no congelamento, foi observado aumento de a^* , assim como na madeira de *E. cloeziana*.

Com relação a variável C^* , para ambas as posições submetidas ao aquecimento, os valores diminuíram em relação ao tratamento controle (Tabelas 3 e 4). Zanuncio et al. (2014) também relataram decaimento dos valores de C^* em seus estudos com aplicação de altas temperaturas em madeira de *E. grandis*.

Ambos os tratamentos térmicos avaliados proporcionaram menores valores de C^* , tornando a madeira mais opaca (Figuras 1 e 2). Esses resultados corroboram os de Garcia et al. (2014). Esses autores afirmaram que a descoloração da madeira durante tratamentos térmicos ocorre devido às reações de condensação e oxidação; e que no caso de madeiras com grande quantidade de extrativos solúveis em água, como as folhosas, as alterações de cor são ainda mais intensas após o tratamento.

A madeira de cerne apresentou tonalidade mais amarelada em relação ao alburno (variável b^*), independente do tratamento aplicado (Figuras 1 e 2). Garcia & Marinonio (2016) também relataram resultado semelhante em estudos com *Tectona grandis*. No entanto, foi verificado que a madeira de *E. grandis* se localiza mais próxima do eixo vermelho (variável h^0), contribuindo para explicar a cor da madeira dessa espécie (Figuras 1 e 2). Por fim, as cores das madeiras de *E. cloeziana* podem ser classificadas como rosa-acinzentada e de *E. grandis* como cinza-oliva, considerando-se os valores encontrados para as variáveis L^* , a^* , b^* , C^* e h^0 (Tabelas 3 e 4), segundo os parâmetros indicados por Gonzalez et al. (2006).

O pico 1.510 cm^{-1} , característico da lignina, teve sua intensidade aumentada em todos os tratamentos térmicos (Figura 3). Cademartori et al. (2013) atribuem esse aumento à degradação da holocelulose, em detrimento da lignina. Os autores afirmam também que a degradação da holocelulose por ocorrer devido à modificação térmica, visto que esse componente possui uma temperatura de degradação inferior. Porém, para *E. grandis* essa tendência não foi observada.

Para a banda localizada em 1.375 cm^{-1} , associada com deformações angulares C-H na celulose e hemicelulose, foi verificado o incremento do pico para *E. cloeziana* tratado hidrotérmicamente e para *E. grandis* no tratamento de congelamento para madeira de cerne (Figura 3). Esta região se refere à estrutura cristalina da celulose e seu aumento se deve à degradação da região amorfa, que detém maior afinidade com a água (Esteves & Pereira, 2009). Segundo esses autores, quando expostas ao calor, a celulose e a lignina possuem degradação mais lenta em relação as hemiceluloses. Entretanto, a maioria dos extrativos degradam ou desaparecem com o calor.

Conclusões

Os tratamentos de imersão em água quente e de congelamento não prejudicam as propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *E. cloeziana* e não interferem nas suas massas específicas aparentes. A variável claridade (L^*) apresenta, em geral, uma diminuição, quando aplicados ambos os tratamentos térmicos, evidenciando o escurecimento da madeira.

Tanto as aplicações de altas temperaturas como de congelamento implicam em menores valores de C^* (referente à saturação da cor), tornando a madeira mais opaca. O tratamento de aquecimento em água acarreta em maiores variações das propriedades químicas das madeiras, possivelmente causando mudanças de cor.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Anexo B - Determinação das propriedades das madeiras para projetos de estruturas. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- AFN. Association Francaise de Normalization. **Norme Francaise, bois essai de choc ou flexion dynamique**: NF B51-009. Paris, 1942. 3 p.
- Beltrame, R. et al. Resistência ao impacto da madeira de açoita-cavalo em diferentes condições de umidade. **Cerne**, v. 16, n. 4, p. 499-504, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602010000400009>.
- Beltrame, R. et al. Resistência ao impacto da madeira de Nogueira-pecã em diferentes condições de umidade. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1583-1587, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012005000060>.
- Cademartori, P. H. G. et al. Colour responses of two fast-growing hardwoods to two-step steam-heat treatments. **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 487-493, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000031>.
- Cademartori, P. H. G. et al. Effect of thermal treatment on physicochemical properties of Gympie messmate wood. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 360-366, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.048>.
- Calonego, F. W. et al. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 4, p. 453-460, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-011-0568-5>.
- Chen, Y. et al. Coloring characteristics of in situ lignin during heat treatment. **Wood Science Technology**, v. 46, n. 1, p. 33-40, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-010-0388-5>.
- Costa, M. A. et al. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 567-577, 2011. <http://dx.doi.org/10.5902/198050983814>.
- Esteves, B. M. & Pereira, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresources.com**, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.
- Garcia, R. A. E. & Marinonio, G. B. Variação da cor da madeira de teca em função da densidade e do teor de extrativos. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 124-134, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.035313>.
- Garcia, R. A. et al. Modificação da cor original da madeira de *Eucalyptus grandis* através de tratamentos termorretificadores. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 449-457, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201420031410>.

- Gonçalez, J. C. et al. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006. <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1912/1156>. Acesso em: 17 jun. 2019.
- Gunduz, G. et al. The effect of heat treatment on some mechanical properties and color changes of uludag fir wood. **Drying Technology**, v. 28, n. 2, p. 249-255, 2010. <https://doi.org/10.1080/07373930903530162>.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual Ibá 2020**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba-2020.pdf>. Acesso em: 08 set. 2021.
- Ilic, J. Advantages of prefreezing for reducing shrinkage-related degrade in eucalypts: General considerations and review of the literature. **Wood Science and Technology**, v. 29, n. 4, p. 277-285, 1995. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00202087>.
- Juizo, C. G. F. et al. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. **Nativa**, v. 6, n. 5, p. 537-542, 2018. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5666>.
- Li, H. et al. Hemicellulose removal from hardwood chips in the pre-hydrolysis step of the kraft-based dissolving pulp production process. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 30, n. 1, p. 46-60, 2010. <https://doi.org/10.1080/02773810903419227>.
- Lima, C. L. et al. Comportamento da cor de lâminas de madeira de Pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum*) tratada com produtos de acabamento. **Revista Árvore**, v. 37, n. 2, p. 377-384, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000200020>.
- Mattos, B. D. et al. Colour changes of Brazilian Eucalypts wood by natural weathering. **International Wood Products Journal**, v. 5, n. 1, p. 33-38, 2014. <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000035>.
- Moura, L. F. de & Brito, J. O. Effect of thermal rectification on colorimetric properties of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 69-76, 2011.
- Pertuzzatti, A. et al. Influência da umidade na resistência da madeira de eucalipto a impactos. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.092514>.
- Silva, E. S. et al. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 1, p. 31-37, 2015. <http://dx.doi.org/10.15210/cmadv6i1.4292>.
- Streck, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS; EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.
- Talgatti, M. et al. Massa específica aparente e suas implicações na flexão dinâmica da madeira de *Hovenia dulcis* Thunb. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 16, n. 1, p. 21-26, 2017. <http://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/download/14191/11221>. Acesso em: 17 jun. 2019.
- Talgatti, M. et al. Tratamentos térmicos e secagem da madeira serrada de uva-do-Japão. **Agrária**, v. 11, n. 3, p. 224-229, 2016. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v11i3a5375>.
- Zanuncio, A. J. V. et al. Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 85-90, 2014. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2014.005>.