

## **Exploração das transformações químicas e físicas na madeira natural e termorretificada de eucalipto**

**Ricardo Marques Barreiros**

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus de Botucatu – São Paulo

**Felipe Dutra Lisboa**

Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciências e Engenharia, Campus de Itapeva – São Paulo

**Cantídio Fernando Gouvea**

Universidade Federal de Sergipe, Campus de São Cristóvão – Sergipe

**Alessandra Maria Ferreira Reis**

Universidade Federal de Sergipe, Campus de São Cristóvão – Sergipe

**Emmanuel Zullo Godinho**

Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga – São Paulo

**Kelly Bossardi Dias**

Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciências e Engenharia, Campus de Itapeva – São Paulo

### **RESUMO**

Em 2018, a produção industrial de madeira roliça global experimentou um notável crescimento de 5%, alcançando uma marca recorde de 2,03 bilhões de metros cúbicos. Nesse cenário, o Brasil se destaca como um dos principais protagonistas, ocupando a quinta posição tanto em produção quanto em consumo de madeira roliça, com uma média anual de 150 milhões de metros cúbicos.

**Palavras-chave:** Produção industrial, Reflorestamento, Eucalipto.

### **1 INTRODUÇÃO**

Em 2018, a produção industrial de madeira roliça global experimentou um notável crescimento de 5%, alcançando uma marca recorde de 2,03 bilhões de metros cúbicos. Nesse cenário, o Brasil se destaca como um dos principais protagonistas, ocupando a quinta posição tanto em produção quanto em consumo de madeira roliça, com uma média anual de 150 milhões de metros cúbicos (FAO, 2018).

A contribuição significativa do Brasil para essa produção provém, em grande parte, do cultivo de espécies como *Eucalyptus* e *Pinus*. Dentre estas, cerca de 70% são representadas por espécies de eucalipto. Essa matéria-prima desempenha um papel crucial ao abastecer setores estratégicos, como energia e celulose, além de ser amplamente utilizada em aplicações estruturais e na indústria moveleira.



O sucesso do eucalipto no Brasil se deve a diversos fatores. Sua fácil adaptação a uma variedade de biomas nacionais, sua característica retilínea, o rápido incremento volumétrico e o alto nível tecnológico associado ao seu cultivo (IBÁ, 2016) são elementos que contribuem para a preferência por essa espécie.

Essa expansão e eficiência na produção de madeira roliça no Brasil refletem não apenas a capacidade do país em atender à demanda crescente, mas também a adoção de práticas sustentáveis e tecnologias avançadas na gestão florestal e na indústria madeireira.

O emprego de espécies de reflorestamento, especialmente o eucalipto, desempenha um papel fundamental na redução da pressão sobre espécies nativas. Estas últimas frequentemente são exploradas de maneira predatória, principalmente na construção civil e na produção moveleira, devido ao seu alto valor final. As espécies de crescimento rápido, como o eucalipto, emergem como alternativas viáveis para substituir aquelas tradicionais que apresentam um crescimento mais lento.

A vantagem no crescimento dessas espécies não apenas oferece uma solução para a demanda crescente, mas também possibilita o aprimoramento genético, resultando em produtos mais adaptados para usos específicos. No entanto, apesar dessas vantagens, a adoção plena dessas espécies enfrenta desafios, como ataques de pragas, baixa estabilidade dimensional e outros problemas apontados pela indústria.

Esses obstáculos, muitas vezes, são apontados como limitações para a aceitação generalizada dessas espécies pelos consumidores finais. Consequentemente, a pesquisa e implementação de técnicas de tratamento, aplicáveis em escala industrial, tornam-se essenciais para aprimorar a qualidade desses produtos. Essas técnicas não apenas visam superar os desafios mencionados, mas também buscam garantir que as espécies de crescimento rápido, como o eucalipto, atendam aos padrões de qualidade necessários para uma variedade de aplicações, promovendo, assim, sua aceitação mais ampla no mercado.

Os processos de modificação da madeira podem ser classificados em quatro tipos distintos: química, superficial, impregnação e térmica. Entre esses, o processo térmico tem experimentado uma evolução notável em termos comerciais, predominantemente devido ao seu baixo custo (MODES et al., 2017).

A termorretificação, que é uma forma de retificação térmica da madeira, confere à madeira colorações semelhantes às de espécies tropicais de maior valor econômico. Além disso, melhora a estabilidade dimensional e a resistência a fungos, tornando-se um processo que agrega considerável valor ao material (MOURA; BRITO; BORTOLETTO JÚNIOR, 2012). Esta técnica não só pode impulsionar a oferta de madeira proveniente de reflorestamento em diversas regiões, mas também contribuir para reduzir a pressão sobre espécies nativas ameaçadas de extinção (BRITO; GARCIA; BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

De acordo com Majano-Majano, Hughes e Cabo (2012), as principais espécies de madeira submetidas a tratamento térmico eram, até certo ponto, do gênero *Pinus*. Somente mais recentemente, tem havido um interesse crescente nessas madeiras tratadas termicamente para aplicações estruturais. Esse



avanço indica uma expansão do escopo de aplicação dessas madeiras, abrindo caminho para sua utilização em contextos estruturais, antes não explorados.

A técnica de tratamento térmico envolve a aplicação intensa e controlada de calor, muitas vezes aliada à pressão em casos específicos, com o objetivo de aprimorar o produto final. Esse processo é realizado em temperaturas inferiores às da carbonização, geralmente até 280°C, ocasionando alterações na estrutura da madeira devido à ação do calor (BORGES; QUIRINO, 2004).

As melhorias proporcionadas por esse tratamento estão associadas à reorganização dos constituintes químicos e anatômicos da madeira. Embora o foco principal seja a produção de móveis, o tratamento térmico também pode ser aplicado em elementos estruturais ou na fabricação de painéis. Isso foi evidenciado por Ferreira et al. (2018), que compararam painéis de pinus tratados termicamente com aqueles submetidos a tratamentos tradicionais, obtendo resultados similares em ambas as abordagens.

Assim, o tratamento térmico não apenas proporciona vantagens em termos de reorganização estrutural da madeira, mas também diversifica suas aplicações, destacando-se não apenas na produção de móveis, mas também como uma alternativa viável para elementos estruturais e na fabricação de painéis. Essa versatilidade destaca o potencial desse método na otimização de diversos produtos derivados da madeira.

No contexto do tratamento térmico, a escolha da faixa de temperatura é uma variável crítica, visto que temperaturas muito baixas podem não ocasionar alterações significativas, enquanto temperaturas extremas podem resultar na degradação do material. De acordo com Pessoa, Filho e Brito (2006), para o *Eucalyptus grandis*, temperaturas mais elevadas proporcionam resultados mais eficazes, principalmente devido à maior resistência contra ataques de cupins. Embora não conferindo resistência total a agentes xilófagos, materiais submetidos a essas temperaturas apresentaram menos danos e maior mortalidade de cupins. Essa tendência para temperaturas mais elevadas também foi corroborada por Fontoura et al. (2015) em ensaios de caracterização mecânica da madeira *Hovenia dulcis*.

Conforme Windeisen, Strobel e Wegener (2007), as mudanças nas características da madeira resultantes de tratamentos térmicos são influenciadas pela espécie, teor de umidade, atmosfera predominante, método de aplicação, temperatura e tempo de exposição. Além disso, a temperatura tem um impacto mais significativo do que o tempo no processo de termorreificação, e alterações químicas e físicas acima de 150 °C são consideradas permanentes.

Essas considerações ressaltam a importância da seleção cuidadosa da temperatura no tratamento térmico, visando otimizar os resultados desejados e minimizar os efeitos indesejados na madeira tratada.

Entre os diversos processos de termorreificação, é comum que compartilhem a característica de expor a madeira a elevadas temperaturas por um período prolongado (ROUSSET; PERRÉ; GIRARD, 2004). No entanto, em algumas espécies, o tempo de exposição pode não ser uma variável crucial, como



demonstrado por Fontoura et al. (2015), que constataram que, para a *Hovenia dulcis*, o tratamento por duas ou quatro horas não gerava alterações significativas no módulo de elasticidade (MOE) e no módulo de ruptura (MOR) da madeira.

Nos experimentos laboratoriais, a termorreificação é geralmente conduzida com a circulação de ar forçada em temperaturas variando de 100 a 200°C, com o tempo de exposição abrangendo de duas horas a um dia inteiro. Esse processo visa promover a degradação de parte das hemiceluloses e a condensação de outros componentes (BRITO; GARCIA; BORTOLETTO, 2006). Portanto, é fundamental realizar estudos sobre a termorreificação em diversas espécies de madeira de reflorestamento, pois as propriedades anatômicas únicas de cada espécie podem conferir características singulares ao produto final. Além disso, a investigação em árvores destinadas a outros setores, além do moveleiro, pode revelar potenciais usos valiosos em algumas florestas, resultando em produtos de maior valor agregado e com potencial tecnológico equivalente.

As referências literárias destacam a importância de aprimorar o entendimento do processo de termorreificação, buscando obter os benefícios desse tratamento térmico com o mínimo de perdas em relação às propriedades originais da madeira. Nesse contexto, a espécie em questão é amplamente utilizada em plantios florestais no Brasil, e os clones selecionados para este estudo são considerados fundamentais para as indústrias madeireiras na região sudoeste paulista.

A pesquisa específica sobre a termorreificação desses clones assume um papel crucial, não apenas para maximizar os benefícios desse processo, mas também para adaptar as técnicas às características únicas da madeira dessa espécie. Ao otimizar o tratamento térmico, é possível explorar todo o potencial dessa matéria-prima, garantindo sua utilização eficiente e sustentável nas indústrias locais. Esse tipo de estudo contribui para o desenvolvimento de práticas mais eficazes na aplicação da termorreificação, resultando em produtos de madeira tratada que atendem tanto às necessidades das indústrias quanto às exigências ambientais.

Essa abordagem abrangente visa proporcionar uma compreensão completa das alterações que ocorrem na madeira submetida a diferentes condições de tratamento térmico, permitindo uma avaliação abrangente do impacto dessas variações nas propriedades físicas e químicas do material. Essa análise detalhada é essencial para informar práticas de tratamento térmico mais eficazes e sustentáveis, bem como para maximizar o potencial de utilização da madeira desses clones híbridos em diversas aplicações industriais.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o desempenho físico e químico da madeira de dois clones híbridos de *Eucalyptus urograndis*. Especificamente, foram analisados a densidade básica, o



inchamento volumétrico e diversos parâmetros químicos, como cinzas, extrativos totais, holocelulose e lignina. As análises foram conduzidas tanto em amostras de madeira *in natura* quanto em amostras submetidas a tratamento térmico em diferentes temperaturas: 140, 160, 180, 200 e 220°C. Os tratamentos foram realizados em condições normais de oxigênio no interior de uma câmara de tratamento térmico.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 OBTENÇÃO DO MATERIAL PARA O ESTUDO

A madeira utilizada neste estudo foi proveniente de 12 árvores selecionadas aleatoriamente de dois clones híbridos de *Eucalyptus urograndis*, denominados aqui como L e H, sendo 6 árvores de cada clone. Essas árvores foram cultivadas em plantios de espaçamento 3,00 m x 2,00 m, situados em condições semelhantes de solo e clima na região de Buri, São Paulo, Brasil, e amostradas com 8,5 anos de idade. É relevante destacar que esse material foi inicialmente plantado para a produção de celulose; no entanto, devido ao porte avantajado das árvores, surgiu o interesse em analisar seu potencial sob diversas variáveis.

#### 3.2 PREPARO E TERMORRETIFICAÇÃO DO MATERIAL

Para o processo de termorretificação, as toras basais dessas árvores foram desdobradas em uma serraria, resultando em pranchas centralizadas em relação à medula, todas com 2,54 cm de espessura e largura variável em relação aos diferentes diâmetros das toras.

, para permitir a determinação das propriedades físicas e químicas da madeira.

O número total de corpos de prova foi de 156, sendo 26 provenientes de cada tratamento. Essa abordagem de amostragem abrangente permitiu uma análise robusta das alterações nas propriedades da madeira decorrentes dos diferentes tratamentos térmicos aplicados.

#### 3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA MADEIRA

A caracterização física da madeira de eucalipto deu-se pela determinação da densidade básica e da avaliação da instabilidade dimensional por meio do inchamento da madeira, tanto *in natura* (controle) quanto termicamente tratada.

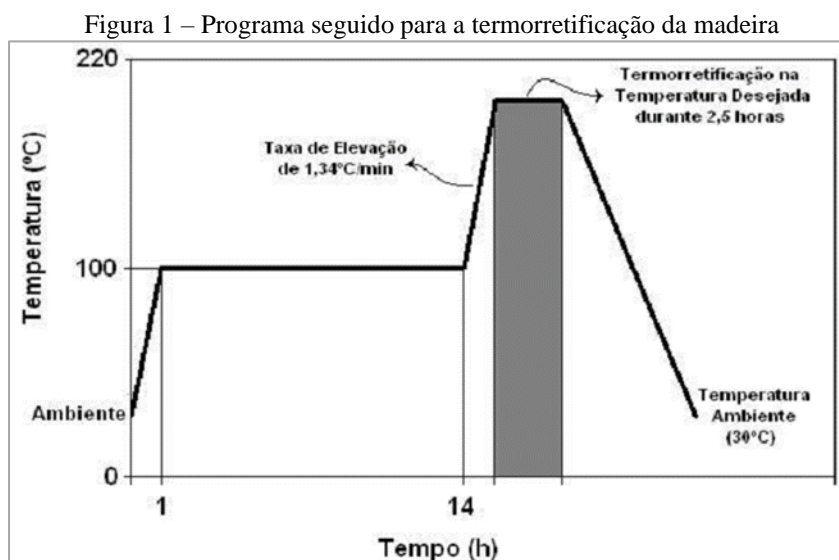
Para isso, foram utilizados corpos de prova isentos de defeitos, como nós e rachaduras, em conformidade com as especificações da ABNT NBR 7190 (1997). Esses corpos de prova apresentaram dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm x 5,0 cm, sendo a maior aresta orientada na direção longitudinal, enquanto a

Posteriormente, as extremidades das pranchas foram removidas devido a rachaduras e cortadas em peças de 70 cm de comprimento. Essas peças foram devidamente identificadas e tiveram seus topos selados com pasta de silicone apropriada para altas temperaturas. Com exceção da amostra controle (testemunha),

todas as peças foram submetidas à termorreificação em uma câmara elétrica a temperaturas de 140, 160, 180, 200 e 220 °C.

Para cada temperatura de termorreificação, duas peças de cada prancha e de cada clone foram separadas e empilhadas de forma gradeada com tabiques dentro da estufa elétrica. Esse material foi aquecido a 100 °C por duas horas e, em seguida, submetido a uma elevação de temperatura de 1,34 °C/min até atingir as temperaturas finais de cada tratamento (CALONEGO et al., 2014). A amostra controle teve sua temperatura elevada a 100 °C até atingir massa constante.

Cada tratamento foi mantido por 2,5 horas, considerando a afirmação de Bhuiyan, Hirai e Sobue (2001) de que a cristalização da celulose ocorre após a primeira hora. Após cada termorreificação, a estufa foi desligada, e as peças de madeira permaneceram em seu interior para resfriamento natural até atingirem a temperatura ambiente.



Fonte: Calonego et al. (2014).

### 3.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

De cada peça resultante de todos os tratamentos, foram retirados dois sarrafos posicionados entre a medula e a periferia, um de cada lado da medula. Esses sarrafos foram posteriormente cortados em corpos de prova com dimensões de 5 cm x 3 cm x 2 cm, orientados nos planos longitudinal, radial e tangencial, respectivamente menor na direção tangencial.

Para cada tratamento, foram selecionados 13 corpos de prova, os quais foram saturados para a determinação da densidade básica e do inchamento. Todos os corpos de prova foram devidamente identificados e submetidos a ensaios seguindo as especificações normativas da ABNT NBR 7190 (1997). Essa metodologia rigorosa proporciona uma avaliação consistente das propriedades físicas da madeira sob diferentes condições de tratamento térmico.



### 3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

A caracterização química da madeira de eucalipto deu-se pela determinação do teor das substâncias químicas de alta massa molecular (holocelulose e lignina) e das substâncias químicas de baixa massa molecular (extrativos e cinzas) na madeira *in natura* (controle) e tratada termicamente.

Foram utilizados 13 corpos de prova de cada tratamento em amostras compostas. A preparação dessas amostras foi realizada conforme a norma TAPPI T 264 cm-97 (1999), em que cada amostra composta foi reduzida a cavacos e, em seguida, a serragem em um macromoinho do tipo Willey. A serragem resultante foi classificada usando peneiras para obter a fração entre 40 e 60 *mesh*. Posteriormente, o teor absolutamente seco da serragem de cada tratamento foi determinado conforme a norma TAPPI T 201 om-93 (1999).

O teor de holocelulose (alfacelulose + hemiceluloses) foi determinado por meio do método clorito de sódio tamponado.

O teor de extrativos totais foi obtido segundo a norma TAPPI T 264 cm-97 (1999).

O teor de cinzas (material inorgânico) foi determinado segundo a norma TAPPI T 211 OM-02 (1999).

O teor de lignina foi calculado usando a Equação 1.

Todas as análises químicas foram realizadas em triplicata, garantindo confiabilidade nos resultados.

$$L = 100 - Et - H \quad (1)$$

Em que: L = teor de Lignina, em %; Et = teor de Extrativos totais, em %; H = teor de Holocelulose, em %.

### 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o Programa R, versão 3.6.2, na plataforma *Windows* de 64 *bits*. Foram aplicados testes de análise de regressão linear em tratamentos fatoriais, considerando duas variáveis como fatores: temperatura e clone.

- **Temperatura:** trata-se de uma variável contínua utilizada para a regressão linear. A condição de controle foi a temperatura de 100 °C, escolhida por razões de modelagem matemática.
- **Clone:** este é um fator qualitativo, gerando duas curvas distintas no sistema fatorial.

As análises foram conduzidas separadamente para cada uma das curvas, avaliando o efeito da temperatura dentro de cada clone. Além disso, foram realizadas comparações entre as curvas para avaliar a similaridade do efeito do tratamento em ambos os clones.

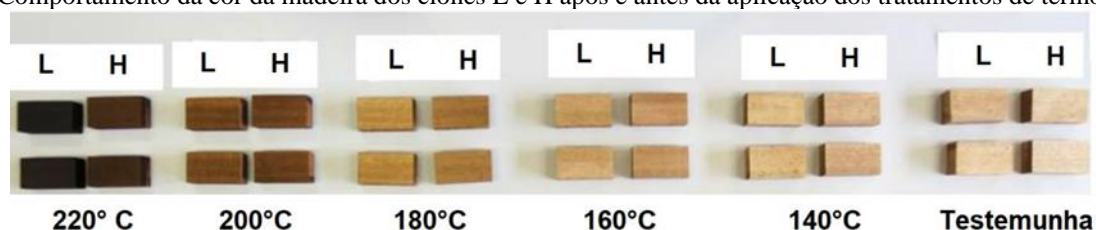
Todos os testes foram conduzidos com um nível de significância de 5%, garantindo a confiabilidade estatística dos resultados obtidos. A utilização de análises fatoriais possibilita uma compreensão mais aprofundada do impacto da temperatura e do clone nas propriedades da madeira.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 COLORAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA

Durante a análise visual das peças de madeira, tanto antes quanto depois dos tratamentos térmicos, observaram-se alterações significativas na coloração em resposta às diferentes temperaturas aplicadas (Figura 2).

Figura 2 – Comportamento da cor da madeira dos clones L e H após e antes da aplicação dos tratamentos de termorretificação



Essa mudança na coloração é resultante de diversas alterações químicas ocorridas durante os tratamentos térmicos. A percepção visual da cor pode desempenhar um papel crucial na aceitação ou rejeição do produto no mercado. Se, por exemplo, peças com coloração mais escura forem menos aceitas pelos consumidores, isso terá implicações importantes.

Para obter peças com uma coloração mais próxima da madeira *in natura*, pode-se considerar a aplicação de temperaturas mais baixas durante os processos de termorretificação. Em temperaturas menores, a alteração na cor é menos perceptível, o que pode ser vantajoso para manter a aparência original da madeira.

### 4.2 DENSIDADE BÁSICA E INCHAMENTO VOLUMÉTRICO

Os testes físicos foram conduzidos tanto na madeira *in natura* quanto na termorretificada nos clones L e H. Os comportamentos da densidade básica são apresentados na Figura 3, enquanto do inchamento volumétrico são ilustrados na Figura 4.



Figura 3 – Comportamento da densidade básica da madeira dos clones L e H em relação aos tratamentos térmicos aplicados

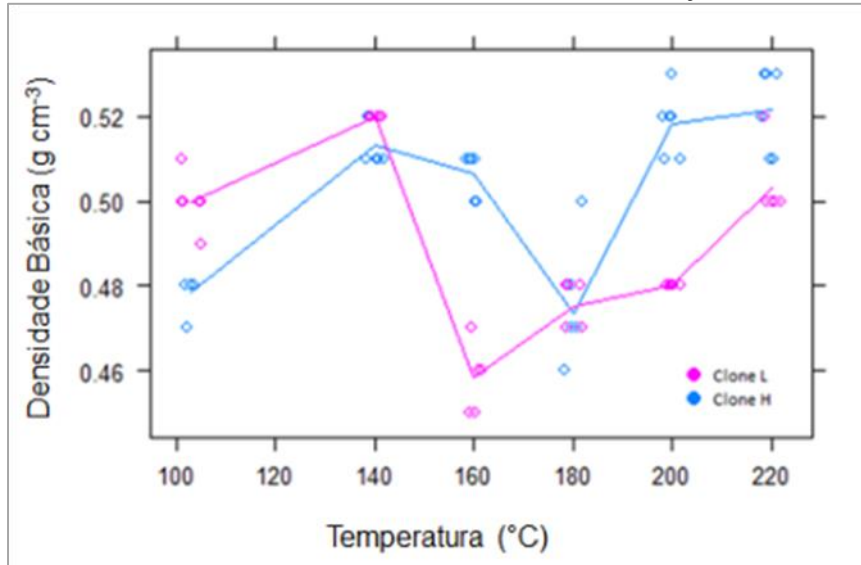
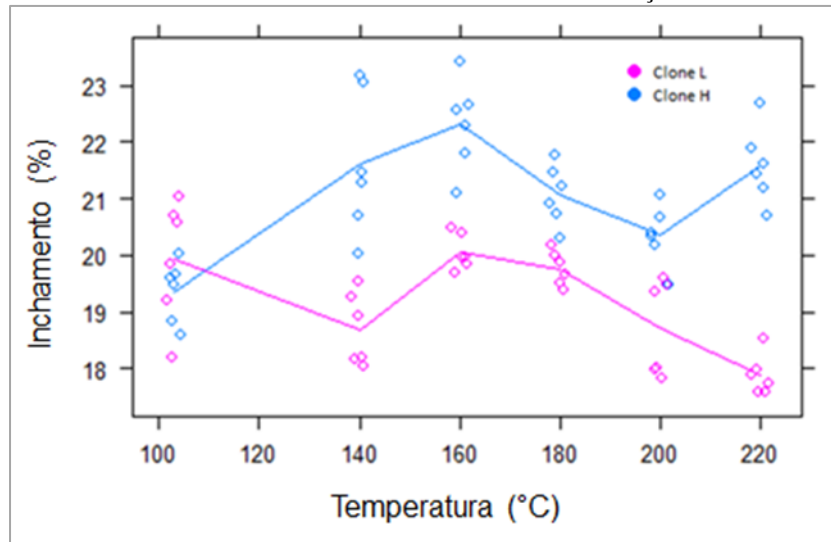


Figura 4 – Comportamento do inchamento da madeira dos clones L e H em relação aos tratamentos térmicos aplicados



Essas figuras proporcionam uma visualização clara de como a densidade básica e o inchamento volumétrico variaram em resposta aos diferentes tratamentos térmicos aplicados nos clones L e H. A análise desses resultados contribui para uma compreensão mais aprofundada do impacto dos tratamentos térmicos nas propriedades físicas da madeira.

O surgimento de rachaduras provenientes dos tratamentos térmicos apresentou desafios significativos na obtenção de corpos de prova sem esse defeito. Essa dificuldade contribuiu para ruídos nas análises estatísticas, especialmente em relação ao inchamento.

O aparecimento de rachaduras prejudicou a obtenção de corpos de prova totalmente homogêneos, ou seja, sem defeitos, tornando as medições mais complexas e gerando comportamentos sem padrões estatísticos conhecidos. Um material com crescimento menos acelerado, que acumulasse menos tensões de

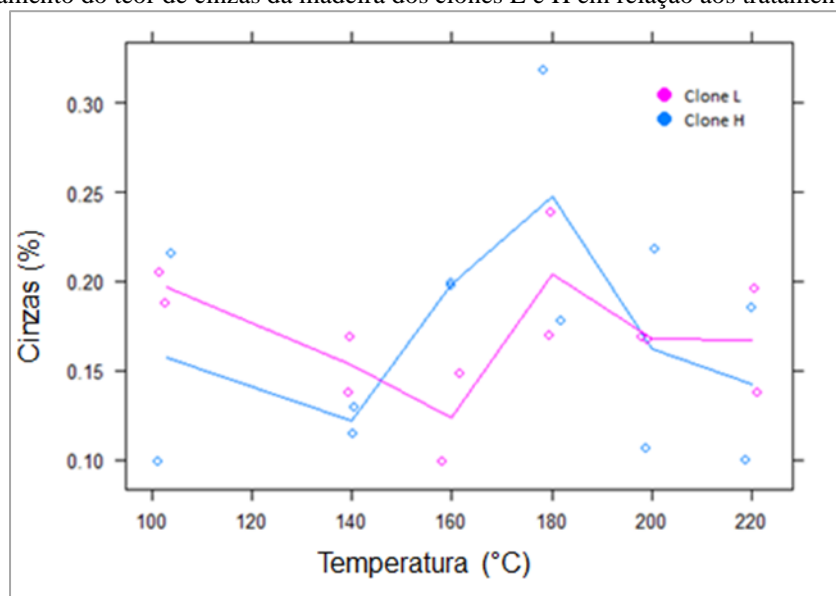
crescimento, seria mais desejável. Isso poderia resultar em menos rachaduras durante o processo de termorreificação, facilitando a obtenção de dados mais consistentes e confiáveis.

Esse desafio destaca a importância não apenas das análises estatísticas, mas também da condição física inicial da madeira, influenciando diretamente a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes.

#### 4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química da madeira dos clones L e H foi avaliada, incluindo a determinação dos teores de cinzas, extrativos totais, holocelulose e lignina. A Figura 5 apresenta o comportamento do teor de cinzas em resposta aos tratamentos térmicos aplicados.

Figura 5 – Comportamento do teor de cinzas da madeira dos clones L e H em relação aos tratamentos térmicos aplicados

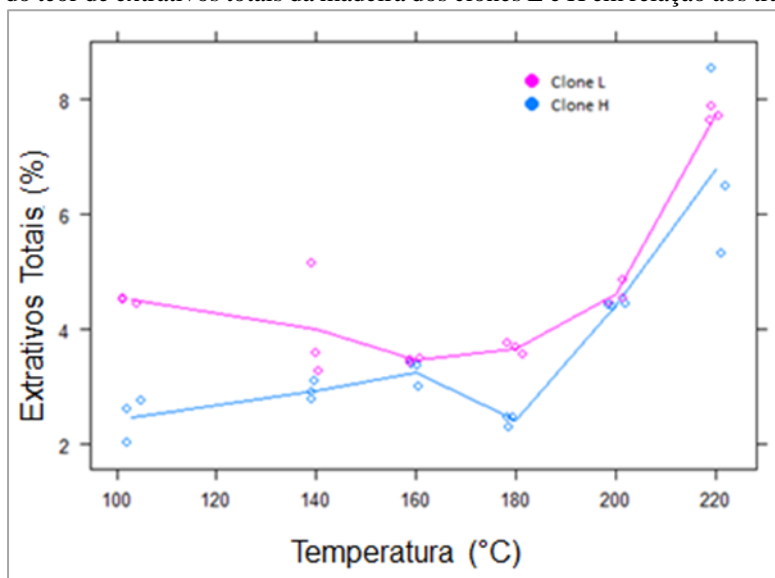


Apesar de observar-se um decréscimo do teor de cinzas em temperaturas mais baixas e um aumento em temperaturas mais elevadas, não foi identificada interferência significativa dos tratamentos térmicos no teor de cinzas, considerando um nível de significância de 5%. Essa análise fornece informações valiosas sobre a estabilidade da composição química da madeira em resposta aos diferentes tratamentos térmicos.

Para o teor de extrativos totais (Figura 6), observou-se um decréscimo em temperaturas mais baixas e um aumento em temperaturas mais elevadas. Esse fenômeno pode ser atribuído à degradação de parte dos constituintes da madeira, especialmente dos extrativos voláteis, em temperaturas mais baixas. Já em temperaturas mais elevadas, essa degradação tornou-se mais significativa, principalmente devido à degradação da holocelulose.

É importante notar que, apesar das diferenças nas temperaturas, o comportamento entre os clones não apresentou divergências significativas a uma significância de 5%. Isso sugere que a variação na temperatura foi o principal fator determinante nas mudanças observadas no teor de extrativos totais.

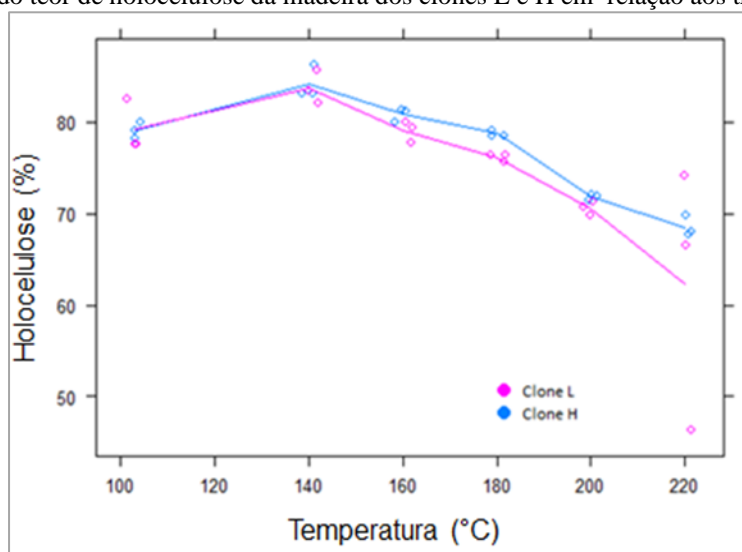
Figura 6 – Comportamento do teor de extrativos totais da madeira dos clones L e H em relação aos tratamentos térmicos aplicados



Com relação à holocelulose (Figura 7), observa-se uma redução em seu teor à medida que a temperatura aumenta, comportamento semelhante para ambos os clones. Esse padrão foi confirmado por testes estatísticos com uma significância de 5%. A degradação da holocelulose pode ser atribuída ao fato de que as hemiceluloses possuem cadeias poliméricas menores do que a celulose (alfacelulose), tornando-as mais suscetíveis à degradação térmica.

É interessante notar que esse comportamento está alinhado com descobertas semelhantes em estudos de degradação térmica da madeira de vários clones de eucalipto, conforme relatado por Pereira et al. (2013).

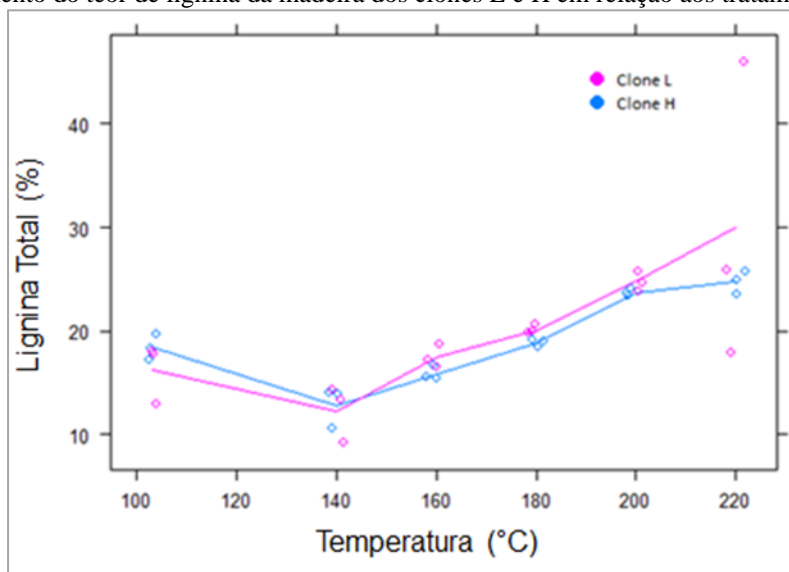
Figura 7 – Comportamento do teor de holocelulose da madeira dos clones L e H em relação aos tratamentos térmicos aplicados



No que diz respeito ao teor de lignina (Figura 8), observou-se uma diferença significativa de seu teor médio em relação aos tratamentos aplicados, com uma significância de 5%. No tratamento a 140 °C, seu teor diminuiu, e posteriormente, aumentou continuamente para ambos os clones.

Esse aumento percebido pode ser atribuído à diminuição da holocelulose. O comportamento sugere que a termorretificação causou o desprendimento entre as cadeias de lignina e hemiceluloses (cadeias menores), facilitando sua degradação. Esse efeito foi corroborado pela determinação da holocelulose.

Figura 8 – Comportamento do teor de lignina da madeira dos clones L e H em relação aos tratamentos térmicos aplicados



Em relação às propriedades químicas analisadas, não houve interferência do fator clone para o comportamento. Isso pode ser observado devido à similaridade das curvas geradas para cada um dos tratamentos realizados e aos testes estatísticos desenvolvidos durante o estudo, todos com uma significância de 5%. Esses resultados indicam que, para ambos os híbridos, a termorretificação agiu de maneira semelhante em termos de composição química da madeira.

Essa uniformidade nas respostas químicas sugere que os clones L e H apresentaram comportamentos químicos comparáveis sob diferentes condições de tratamento térmico, o que é uma informação relevante para considerações práticas em aplicações futuras desses materiais tratados termicamente.

Essa consistência entre os clones também pode simplificar futuras aplicações práticas, pois indica que as variações genéticas entre esses clones podem não ter um impacto significativo nas mudanças químicas induzidas pela termorretificação.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho proporcionou *insights* valiosos, incluindo:

**Temperaturas indicadas para a termorreificação:** os tratamentos mais indicados para a termorreificação em ambos os clones foram aqueles realizados até 180 °C. Isto se baseia na coloração pouco modificada em relação à madeira natural e no provável menor consumo energético em comparação com tratamentos a temperaturas mais elevadas.

**Propriedades físicas:** não foi possível obter resultados conclusivos para as propriedades físicas devido a colapsos e rachaduras nas peças. Esses defeitos podem ter ocorrido porque esses clones não eram destinados ao desdobro em serraria, e sim à obtenção de celulose. Ao aplicar um tratamento agressivo à madeira, ela reagiu com a formação desses defeitos.

**Propriedades químicas:** a termorreificação em temperaturas mais elevadas (200 e 220°C) degradou grande parte dos constituintes químicos da madeira em ambos os clones. Esse resultado levanta preocupações sobre a possível diminuição da resistência mecânica da madeira se utilizada para fins estruturais.

Estas considerações destacam a importância de considerar não apenas as mudanças estéticas, mas também os impactos nas propriedades físicas e químicas ao aplicar tratamentos térmicos à madeira. O equilíbrio entre a obtenção dos efeitos desejados e a manutenção das propriedades essenciais é crucial ao empregar a termorreificação como técnica de modificação da madeira.



## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Ações nas estruturas, propriedades da Madeira e dimensionamento dos estados limites de utilização - NBR 7190: 1997. ABNT, Rio de Janeiro, 1997. 107 P.
- BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose. J. Wood Sci., Tokyo, v. 47, n. 5, p. 336-341, 2001.
- BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratada termicamente. Revista Biomassa & Energia, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.
- BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. Rev. Cerne, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.
- CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; LATORRACA, J. V. F. Effect of thermal modification on the physical properties of juvenile and mature woods of *Eucalyptus grandis*. Floresta e Ambiente, Rio de Janeiro, v. 21, p. 108-113, 2014.
- FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; RANGEL, E. C. Efeito da termorretificação na qualidade de colagem de lâminas de madeira para a produção de compensado. Ciência Florestal (Online), Santa Maria, v. 28, p. 274-282, 2018.
- FONTOURA, M. R. et al. Propriedades mecânicas e químicas da madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg. tratada termicamente. Ci. Madeira (Braz. J. Wood Science), Pelotas, v. 6, n. 3, p. 166-175, 2015.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). 2018. Global Forest Products. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca7415en/ca7415en.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2023.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). 2016. Relatório Anual. Disponível em: <[http://www.iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016\\_pdf](http://www.iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2023.
- MAJANO-MAJANO, A.; HUGHES, M.; CABO, J. L. F. The fracture toughness and properties of thermally modified beech and ash at different moisture contents. Wood Sci. Technol., Munique, v. 1, n. 46, p. 5-21, 2012.
- MODES, K., S; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A.; HASELEIN, C. R. Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 27, p. 291-302, 2017.
- MOURA, L. F. de; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JR, G. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Floresta, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 305-314, abr./jun. 2012.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. Rev. Árvore, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 567-576, may/jun., 2013.



PESSOA, A. M. C.; FILHO, E. B.; BRITO, J. O. Avaliação da madeira termorretificada de *Eucalyptus grandis* submetida ao ataque de cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis*. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 1, n. 72, p. 11-16, 2006.

ROUSSET, P.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. Holz als Roh - und Werkstoff, Berlin, v. 62, n. 2, p. 113-119, 2004.

THECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). Test methods (compact disc): 1998-1999. Atlanta: TAPPI (CD-ROM), 1999.

WINDEISEN, E.; STROBEL, C.; WEGENER, C. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. Wood Sci. Technol., Munique, v. 41, n. 6, p. 523-536, 2007.