



**JOSÉ ALVES DOS SANTOS JÚNIOR**

**PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA  
MADEIRA TERMICAMENTE MODIFICADA POR REDES  
NEURAIS ARTIFICIAIS**

**LAVRAS – MG  
2024**

**JOSÉ ALVES DOS SANTOS JÚNIOR**

**PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA TERMICAMENTE  
MODIFICADA POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
Orientador  
Prof. Dr. José Tarcísio Lima  
Co-orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos Júnior, José Alves dos.

Predição de propriedades mecânicas da madeira termicamente modificada por redes neurais artificiais / José Alves dos Santos Júnior. - 2021.

71 p. : il.

Orientador(a): José Moreira da Silva.

Coorientador(a): José Tarcísio Lima.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira. 2. Colorimetria. 3. Predição por Redes Neurais Artificiais. I. Silva, José Moreira da. II. Lima, José Tarcísio. III. Título.

**JOSÉ ALVES DOS SANTOS JÚNIOR**

**PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA TERMICAMENTE  
MODIFICADA POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

**PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY MODIFIED  
WOOD USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 15 de dezembro de 2021  
Dr. Paulo Ricardo Gherardhi Hein UFLA  
Dr. Paulo Fernando Trugilho UFLA  
Dr. Allan Motta Couto UEMS

---

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
Orientador  
Prof. Dr. José Tarcísio Lima  
Co-orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

*A minha família, em especial a minha mãe que sempre me incentivou e me apoiou nas  
minhas escolhas.*

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, expresso minha gratidão a Deus por todo conhecimento, por nunca ter me abandonado e pelas conquistas realizadas ao longo da jornada.

À minha família, em especial à minha mãe, Maria do Amparo, ao meu pai, José Alves, e às minhas irmãs, Polyana Andrade e Joelma Andrade, dedico um agradecimento especial. Graças a eles, sempre tive apoio em minhas escolhas, mesmo quando elas me afastavam deles.

Aos amigos de Lavras, que proporcionaram momentos felizes e ofereceram muita força, construindo comigo uma segunda família. Estendo meu agradecimento também aos amigos distantes, que mesmo à distância, permanecem presentes em meu coração.

Ao meu amigo e irmão que a vida me deu, Renildo Medeiros, expresso minha profunda gratidão por seu apoio e incentivo durante os momentos mais difíceis de minha vida, especialmente no término do mestrado.

Ao professor Luiz Eduardo, agradeço por seu constante encorajamento e fé em meu potencial. Ele não apenas é um exemplo de vida, mas também uma fonte de inspiração e um grande amigo.

A todos os professores que contribuíram para minha jornada acadêmica, deixando sua marca em momentos cruciais que me impulsionaram até onde cheguei.

Ao orientador, professor José Reinaldo, manifesto meu reconhecimento pelo conhecimento transmitido nas disciplinas de física da madeira e usinagem da madeira. Esse suporte continua a ser fundamental para minha compreensão até hoje.

Aos professores, José Tarcísio e Paulo Trugilho, agradeço pelos valiosos ensinamentos durante minhas análises, que enriqueceram minha formação.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, expresso minha gratidão pela infraestrutura e pelos equipamentos que foram essenciais para a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Muito Obrigado!

## RESUMO

Tratamentos visando à melhoria das características da madeira têm sido amplamente empregados para incrementar seu valor na indústria. Entre esses tratamentos, destaca-se a modificação térmica. Entretanto, após o tratamento, a avaliação das propriedades mecânicas torna-se crucial, uma vez que frequentemente há redução na resistência. Paralelamente, as redes neurais artificiais (RNAs) têm desempenhado papel significativo na avaliação de qualidade e no processamento da madeira, oferecendo potencial fundamental para a previsão de suas características. Este estudo teve como objetivos investigar o efeito do tratamento térmico, em diferentes temperaturas nas propriedades mecânicas e características colorimétricas da madeira de *Pinus* e desenvolver modelos de previsão utilizando Redes Neurais Artificiais (RNAs) para estimar o Módulo de Elasticidade (MOE) e o Módulo de Ruptura (MOR) com base nos parâmetros do tratamento térmico e nas características colorimétricas. O estudo envolveu a realização de ensaios mecânicos de flexão estática, análises colorimétricas e tratamentos térmicos em corpos de prova de madeira de *Pinus elliottii*. Os resultados demonstraram que o tratamento térmico afetou significativamente as propriedades mecânicas da madeira, com aumento do MOE até 160°C e redução gradual em temperaturas mais elevadas, enquanto o MOR apresentou tendência de redução a partir de 180°C. O tratamento térmico da madeira de *Pinus elliottii* teve impactos significativos nas características colorimétricas. A luminosidade ( $L^*$ ) houve uma relação positiva em 160°C e, posteriormente, diminuiu, enquanto o matiz vermelho ( $a^*$ ) e o matiz amarelo ( $b^*$ ) mostraram variações específicas em diferentes temperaturas. A saturação de cor ( $C^*$ ) e o ângulo de tonalidade ( $h^*$ ) também foram afetados pelo tratamento térmico, com resultados que variaram de acordo com as condições de temperatura e tempo de exposição. Os modelos de previsão desenvolvidos por RNAs mostraram-se eficazes na estimativa do MOE e MOR com base nos parâmetros de tratamento térmico e nas características colorimétricas da madeira. Os resultados indicaram que os modelos de RNA alcançaram níveis satisfatórios de precisão, com MAPE de 11,90% para o MOE e 14,41% para o MOR. Além disso, os valores de  $R^2$  foram de 0,82 para o MOE e 0,81 para o MOR, demonstrando a capacidade dos modelos de explicar as variações nas propriedades mecânicas. Quanto às implicações práticas, os modelos de previsão desenvolvidos podem ser aplicados na indústria da madeira tratada termicamente para otimizar processos de produção, prever a vida útil de produtos e melhorar a qualidade dos produtos. No entanto, é importante considerar a sensibilidade dos modelos a variações extremas nos dados e identificar possíveis melhorias, como a inclusão de variáveis adicionais relacionadas à fabricação e tratamento térmico da madeira.

**Palavras-chave:** Tratamento térmico. *Pinus elliottii*. Propriedades mecânicas. Características colorimétricas. Redes neurais artificiais. Qualidade da madeira.

## ABSTRACT

Treatments aimed at improving wood characteristics have been widely employed to enhance its value in the industry. Among these treatments, thermal modification stands out. However, after treatment, the evaluation of mechanical properties becomes crucial, as there is often a reduction in strength. Concurrently, artificial neural networks (ANNs) have played a significant role in wood quality assessment and processing, offering fundamental potential for predicting its characteristics. This study aimed to investigate the effect of thermal treatment at different temperatures on the mechanical properties and colorimetric characteristics of *Pinus* wood and develop prediction models using Artificial Neural Networks (ANNs) to estimate the Modulus of Elasticity (MOE) and Modulus of Rupture (MOR) based on thermal treatment parameters and colorimetric characteristics. The study involved static bending mechanical tests, colorimetric analyses, and thermal treatments on *Pinus elliottii* wood specimens. The results demonstrated that thermal treatment significantly affected the mechanical properties of wood, with an increase in MOE up to 160°C and a gradual reduction at higher temperatures, while MOR showed a decreasing trend from 180°C onwards. Thermal treatment of *Pinus elliottii* wood had significant impacts on colorimetric characteristics. Brightness ( $L^*$ ) exhibited a positive relationship at 160°C and then decreased, while red hue ( $a^*$ ) and yellow hue ( $b^*$ ) showed specific variations at different temperatures. Color saturation ( $C^*$ ) and hue angle ( $h^*$ ) were also affected by thermal treatment, with results varying according to temperature conditions and exposure time. The ANN prediction models proved effective in estimating MOE and MOR based on thermal treatment parameters and wood colorimetric characteristics. The results indicated that the ANN models achieved satisfactory levels of accuracy, with MAPE of 11.90% for MOE and 14.41% for MOR. Additionally,  $R^2$  values were 0.82 for MOE and 0.81 for MOR, demonstrating the models' ability to explain variations in mechanical properties. In terms of practical implications, the developed prediction models can be applied in the thermally treated wood industry to optimize production processes, predict product lifespan, and enhance product quality. However, it is important to consider the models' sensitivity to extreme data variations and identify potential improvements, such as the inclusion of additional variables related to wood manufacturing and thermal treatment.

**Keywords:** Thermal treatment. *Pinus elliottii*. Mechanical properties. Colorimetric characteristics. Artificial neural networks, Wood quality.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2.1. Modificação térmica da madeira</b> .....	10
<b>2.2. Efeito da modificação térmica nos constituintes da madeira</b> .....	11
<b>2.3. Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas</b> .....	13
2.3.1. Perda de massa da madeira.....	13
2.3.2. Densidade da madeira .....	14
2.3.3. Higroscopicidade e instabilidade dimensional.....	16
2.3.4. Módulo de elasticidade (MOE).....	17
2.3.5. Módulo de ruptura (MOR) .....	19
<b>2.4. Colorimetria</b> .....	19
<b>2.5. Redes neurais artificiais (RNA's)</b> .....	21
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	25
<b>3.1. Obtenção e processamento do material</b> .....	25
<b>3.2. Tratamento térmico</b> .....	26
<b>3.3. Perda de massa</b> .....	26
<b>3.4. Análise colorimétrica</b> .....	27
<b>3.4. Propriedades mecânicas</b> .....	28
<b>3.6. Análise de componentes principais (PCA)</b> .....	29
<b>3.7. Redes neurais artificiais - RNA</b> .....	29
3.6.2. Avaliação do desempenho das redes neurais .....	31
3.6.3. Conjuntos covariáveis para RNA .....	33
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
<b>4.1. Umidade da madeira em equilíbrio</b> .....	33
<b>4.2. Perda de massa</b> .....	36
4.3.1. Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de ruptura (MOR).....	43
<b>4.6.1. Desempenho das redes neurais artificiais treinadas</b> .....	60
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	63
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	64

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais versáteis e amplamente utilizados na indústria de construção civil e fabricação de móveis, devido às suas propriedades naturais de resistência, durabilidade e estética. No entanto, a busca contínua por aprimoramentos nas características da madeira levou ao desenvolvimento de diversos tratamentos visando a otimização de suas propriedades. Entre esses tratamentos, a modificação térmica surgiu com abordagem eficaz para melhorar a estabilidade dimensional e para expandir seu potencial de aplicação.

A modificação térmica envolve a exposição da madeira a temperaturas elevadas, geralmente na faixa de 160°C a 240°C, em ambiente controlado, com a ausência de oxigênio. Esse processo promove alterações na composição química da madeira, resultando em benefícios, como a redução da higroscopicidade, aumento da resistência ao apodrecimento e melhoria na estabilidade dimensional. No entanto, o tratamento térmico pode também influenciar significativamente nas propriedades mecânicas e nas características colorimétricas da madeira.

A avaliação das propriedades mecânicas após o tratamento térmico é de extrema importância, uma vez que, frequentemente, observa-se redução na resistência mecânica da madeira. A compreensão dessas mudanças é fundamental para garantir que a madeira tratada termicamente atenda aos requisitos de desempenho em diversas aplicações industriais. Além disso, a capacidade de prever com precisão as propriedades mecânicas da madeira após o tratamento térmico é de grande valor, pois pode orientar a seleção de processos de produção adequados e permitir a otimização das propriedades desejadas.

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) têm emergido como ferramenta poderosa na avaliação da qualidade e no processamento da madeira. As RNAs são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, capazes de capturar relações complexas entre entradas e saídas, mesmo em sistemas não lineares. Sua capacidade de aprendizado e adaptação as torna ideais para a previsão de propriedades da madeira com base em múltiplos parâmetros, incluindo informações sobre o tratamento térmico e características colorimétricas.

O objetivo principal foi investigar o impacto do tratamento térmico, em diferentes temperaturas, nas propriedades mecânicas e características colorimétricas da madeira de *Pinus elliottii*. Além disso, buscou-se desenvolver modelos de previsão por meio de RNAs para estimar o Módulo de Elasticidade (MOE) e o Módulo de Ruptura (MOR), com base nos parâmetros do tratamento térmico e nas características colorimétricas, para auxiliar na

otimização de processos de produção, previsão de vida útil de produtos e melhoria da qualidade dos produtos a base de madeira termicamente tratada.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Modificação térmica da madeira**

A modificação térmica tem sido amplamente recomendada para aprimorar a estabilidade dimensional, o comportamento higroscópico, a resistência à biodeterioração e, em casos de madeiras de baixa densidade, aumentar a dureza superficial (HILL, 2006). No entanto, é importante considerar que esse processo pode acarretar efeitos adversos, como a diminuição das propriedades mecânicas da madeira.

A princípio, a modificação térmica envolve a degradação térmica e o rearranjo molecular dos componentes da parede celular da madeira, especialmente das hemiceluloses de baixo peso molecular (FU et al., 2020a). Além disso, pode ser caracterizada como resultado de pirólise controlada que ocorre antes do início do processo de reações exotérmicas, aproximadamente em 280°C, momento em que a combustão espontânea da madeira é deflagrada, conforme observado por Borges e Quirino (2004).

De acordo com Brito et al., 2008, a submissão da madeira a temperaturas elevadas, abaixo do ponto de combustão, resulta no início da degradação de seus constituintes químicos fundamentais. Esse processo afeta primariamente as hemiceluloses, que se mostram mais suscetíveis às influências térmicas. O produto resultante desse processo é a madeira termicamente modificada.

A perda de componentes macromoleculares pode ser observada em temperaturas acima de 100°C, sendo essa perda intensificada com o aumento tanto do tempo quanto da temperatura (MILLETT; GERHARDS, 1972). As temperaturas empregadas no processo de tratamento térmico variam entre 100°C e 250°C, conferindo características distintas à madeira quando comparada à sua forma original (VOVELLE; MELLOTTI-E; DELBOURGO, 1982). Essas diferenças revelam-se tecnicamente relevantes para diversas aplicações da madeira.

Na Europa, a modificação térmica é empregada em escala industrial, em especial com patentes em alguns países, como Finlândia, França, Holanda e Alemanha. As diferenças dos tratamentos térmicos adotados são: a umidade inicial da madeira, as temperaturas e os tempos em que o material é exposto a alta temperatura, a utilização de oxigênio ou nitrogênio, a presença ou não de vapor, o processo ser seco ou úmido e a utilização de óleos (MENEZES et

al., 2014). No Brasil, os estudos em escala laboratorial tiveram início na década 1980, em que foram utilizadas estufas elétricas, muflas e autoclaves (BATISTA, 2012a).

## **2.2. Efeito da modificação térmica nos constituintes da madeira**

A madeira, como um material natural, é composta por uma complexa combinação química de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. A proporção aproximada desses componentes é de 50% de celulose, 20% de hemicelulose e 30% de lignina. Além desses elementos, a madeira contém extrativos, que são compostos químicos produzidos e armazenados nas células vegetais. Esses extrativos desempenham diversas funções fisiológicas nas árvores, como proteção contra insetos e patógenos, regulação do crescimento e participação na fotossíntese, entre outras atividades metabólicas (OHASHI et al., 1990). Geralmente, os extrativos são mais abundantes na casca da madeira e podem englobar terpenos, óleos essenciais, resinas, fenóis, taninos, graxas e corantes (HILL, 2006)

Quando a madeira é submetida a altas temperaturas, ocorre a degradação de hemicelulose, lignina e celulose, resultando na liberação de água, dióxido de carbono, ácido fórmico, ácido acético e outras substâncias que podem estar envolvidas em reações de condensação e formação de grupos cromóforos (HAKKOU et al., 2005a).

O tratamento térmico promove uma redução significativa nas hemiceluloses, que possuem afinidade por água e, assim, a higroscopicidade da madeira termicamente modificada é consideravelmente reduzida. Isso se deve à diminuição dos grupos hidroxilas (OH) na madeira, os quais são responsáveis pela ligação com a água (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). O processo de degradação tem início com a desacetilação, na qual o ácido acético age como catalisador de despolimerização, acelerando a decomposição dos polissacarídeos (NUOPPONEN et al., 2004; TJEERDSMA et al., 1998). No entanto, a redução na higroscopicidade também pode afetar a molhabilidade da madeira, somando-se à redução das propriedades mecânicas (HILL, 2006).

As alterações químicas desencadeadas pelo aquecimento dependem da duração e da temperatura do tratamento, sendo a temperatura o principal fator. Temperaturas mais baixas, entre 20°C e 150°C, conduzem a um processo de secagem, onde a madeira perde água livre e água adsorvida (BOURGOIS; BARTHOLIN; GUYONNET, 1989). À medida que a madeira é aquecida, observa-se inicialmente diminuição da massa devido à perda de água e extrativos voláteis, fazendo com que os extrativos menos voláteis migrem para a superfície da madeira

(HILL, 2006). Na faixa de temperatura entre 180°C e 250°C, frequentemente empregada em tratamentos térmicos, ocorrem alterações químicas na madeira, enquanto temperaturas acima de 250°C marcam o início do processo de carbonização, com liberação de CO<sub>2</sub> e outros produtos da pirólise (ESTEVES; DOMINGOS; PEREIRA, 2008).

A modificação térmica tem o potencial de alterar a quantidade de determinados componentes da madeira. Um estudo conduzido por Lengowski (2011) avaliou propriedades químicas de madeira submetida a termorretificação a 160°C e constatou um aumento significativo nos teores de lignina e extrativos totais para madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Tectona grandis* e *Pinus taeda*. Esse aumento é atribuído à possível solubilização de componentes que tiveram suas ligações químicas alteradas pelo tratamento. De acordo com a autora, essa solubilização pode resultar em uma maior concentração desses componentes na madeira tratada termicamente. Além disso, as altas temperaturas envolvidas no tratamento também podem levar à reorganização e polimerização de componentes da madeira, contribuindo para as alterações na composição química (HERRERA et al., 2014). Vale ressaltar que a natureza e a magnitude dessas mudanças podem variar dependendo da espécie de madeira e das condições específicas do tratamento.

Outra pesquisa, realizada por Sikora et al. (2018), investigou as mudanças na cor e na química das madeiras de *Picea abies* e *Quercus robur* devido à modificação térmica, revelando diminuição nos polissacarídeos em ambas as espécies, especialmente a degradação das hemiceluloses, resultando em perdas de 37,40% a 210°C para *P. abies* e 58,84% para *Quercus robur*. Os autores destacam que, apesar da degradação de hemiceluloses e de certos extrativos, novos extrativos são formados devido à decomposição dos principais componentes.

O tratamento térmico da madeira juvenil e adulta de *Pinus elliottii* var. *elliottii* a 200°C resultou em diversas modificações, como a redução de 20,1% e 16,1% na umidade e no inchamento volumétrico da madeira adulta, respectivamente, e redução de 22,9% e 14,8% nas propriedades equivalentes da madeira juvenil. Houve também aumento de 34,1% e 89,2% no teor de extrativos da madeira juvenil e adulta, respectivamente, além de queda de 3,4% e 4,6% no teor de holocelulose devido à degradação das hemiceluloses (SEVERO; CALONEGO; SANSÍGOLO, 2012).

O aquecimento da madeira a temperaturas próximas de 200°C leva à degradação das hemiceluloses e da região amorfa da celulose, contribuindo para aumento no grau de cristalinidade desse polímero (BRITO et al., 2008b). Contudo, a modificação térmica da madeira induz alterações substanciais nos seus constituintes químicos, levando a

transformações na proporção de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. Esse processo é influenciado principalmente pela temperatura e duração do tratamento, com temperaturas mais elevadas levando a degradações mais significativas. Enquanto as hemiceluloses, devido à sua vulnerabilidade ao calor, sofrem redução notável, a lignina e outros extrativos podem apresentar aumento em suas concentrações devido a mudanças em suas ligações químicas. As consequências dessas modificações químicas podem ser observadas não apenas nas propriedades mecânicas da madeira, mas também na sua higroscopicidade, cristalinidade e outras características importantes.

### **2.3. Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas da madeira**

O estudo das propriedades físicas e mecânicas da madeira é fundamental para ampliar o seu potencial de utilização, adequar suas aplicações e substituir outras madeiras (ESTEVES; DOMINGOS; PEREIRA, 2008). Diferenças nas características da madeira podem ser observadas entre diferentes espécies, indivíduos da mesma espécie e até mesmo entre distintas regiões do mesmo indivíduo.

A modificação química da madeira em altas temperaturas acarreta diversas melhorias nas suas propriedades físicas. Isso inclui redução na contração e intumescimento, aumento na durabilidade biológica, menor umidade de equilíbrio, maior resistência às intempéries e melhorias no isolamento térmico (RAPP, 2001).

#### **2.3.1. Perda de massa da madeira**

Uma das características mais afetadas no tratamento térmico é a perda de massa da madeira (SANDBERG; KUTNAR; MANTANIS, 2017). O aquecimento da madeira, em altas temperaturas, resulta na redução de sua massa e volume (STAMM, 1956). Essas alterações são dependentes do tratamento empregado, da temperatura e do tempo de exposição, sendo influenciadas pela degradação de componentes como hemiceluloses, lignina e extrativos. Essa perda de massa não apenas reflete as mudanças estruturais da madeira, mas também está diretamente relacionada às variações nas propriedades mecânicas, sendo importante indicador da qualidade da madeira tratada termicamente (KUBOVSKÝ; KAČÍKOVÁ; KAČÍK, 2020).

A perda de material da parede celular resulta em alterações dimensionais da madeira, o que pode levar a ocorrência de distorções em peças maiores. Com a perda de massa, a densidade da madeira diminui à medida que o tempo e a temperatura do processo de tratamento térmico

aumentam. Porém, as mudanças que ocorrem na madeira durante o tratamento térmico são explicadas pela relação entre a perda de massa e a alteração do volume (HILL, 2006).

Nhacila et al. (2020) trabalharam com madeiras de *Brachystegia spiciformis* e de *Julbernardia globiflora* nas temperaturas de 215°C, 230°C e 245°C, no período de 2 horas. Os autores relataram que para a madeira de *B. spiciformis* houve redução de 27% da massa para a temperatura de 245°C e para *J. globiflora*, a redução foi de 23%.

Zaman, Alen e Kotilainen, 2000 trabalharam as madeiras de *Pinus sylvestris* e *Betula pendula* tratados nas temperaturas entre 200°C e 230°C no tempo de 4 e de 8 horas e determinaram as perdas de massa. Para a madeira de *Pinus sylvestris* as perdas de massa variaram de 5,7%, em 4 horas, 7,0% em 8 horas, ambos a 200°C. Na temperatura de 230°C, os valores encontrados foram de 11,1% e 15,2%, para 4 horas e 8 horas, respectivamente. Para a madeira de *B. pendula*, a perda de massa variou de 6,4%, no tempo de 4 horas e de 10,2%, no tempo de 8 horas, a 200°C e de 13,5% e 15,2%, a 230°C, para os tempos de 4 e 8 horas, respectivamente. Segundo os autores, as diferenças nas perdas de massa se devem principalmente ao fato de que os carboidratos (celulose e hemiceluloses) eram mais suscetíveis a várias reações de degradação do que a lignina na madeira não tratada.

Čermák, Hess e Suchomelová (2021) analisaram a cinética da perda de massa de madeira modificadas termicamente de 4 espécies (*Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Quercus robur*, *Pinus sylvestris*) na faixa de temperatura de 140°C à 220°C com o intervalo de 20°C entre os tratamentos e no tempo de tratamento de 1 a 6 horas. Os autores relataram que no processo de modificação térmica a influência da temperatura do tratamento foi significativamente mais evidente na madeira do que a influência do tempo de tratamento. Os autores revelam que as diferenças entre as espécies estudadas foram significativas nas temperaturas acima de 160°C. Essas diferenças podem ser explicadas pelas reações no início dos processos de degradação térmica, principalmente na evaporação da água que está quimicamente ligada a volatilização de compostos extraíveis voláteis. A perda de massa como consequência da degradação térmica da madeira é altamente correlativa as outras características da madeira, principalmente a densidade.

### 2.3.2. Densidade da madeira

A densidade é uma das propriedades mais essenciais da madeira, uma vez que mantém relação direta com a massa, composição celular, resistência mecânica e estabilidade

dimensional. A variação da densidade básica é influenciada por fatores que afetam a estrutura da madeira, bem como pela presença de inclusões (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Durante o processo de modificação térmica, ocorre diminuição na densidade da madeira. Após tratamentos suaves, é observado um aumento nos módulos de elasticidade e dureza (BOONSTRA et al., 2007). A redução da densidade como resultado da modificação térmica está relacionada à volatilização de componentes da madeira, como terpenos, gorduras, ceras e fenóis, que degradam junto com os produtos resultantes da decomposição das hemiceluloses (MANIA et al., 2020).

Lengowski (2011) relatou que após o tratamento térmico a 160°C, houve redução de 23,21% na densidade da madeira de *Pinus taeda*, enquanto a densidade da *Tectona grandis* diminuiu em 2,81%. Essa redução está relacionada a degradação das hemiceluloses em produtos voláteis, bem como a evaporação dos extrativos, relata a autora. No entanto, a madeira de *Eucalyptus grandis* apresentou aumento de 16,92% na densidade após o tratamento, em comparação com a madeira não tratada. Uma das razões para o aumento da densidade pode ser a remoção de componentes voláteis, como água e certos extrativos, que são expelidos da madeira devido ao aquecimento. Isso resulta em redução na porosidade da madeira e, conseqüentemente, em aumento na densidade aparente. Além disso, a degradação parcial das hemiceluloses e a reorganização da lignina durante o tratamento térmico podem levar à formação de estruturas mais compactas na madeira, contribuindo para o aumento da densidade.

Batista (2012) observou reduções nas densidades básica, anidra e aparente de 9,8%, 13,0% e 16,3%, respectivamente, após o tratamento a 180°C. Segundo o autor, a redução da densidade decorre da perda de massa dos constituintes da parede celular, que também é a fonte da diminuição da higroscopicidade da madeira.

Em estudo conduzido por Nachila et al. (2020), a madeira de *Brachystegia spiciformis* apresentou redução na densidade de 0,650 para 0,560 g/cm<sup>3</sup> no processo de termorretificação a 245°C. Para *Julbernardia globiflora*, a redução da densidade foi de 0,810 para 0,740 g/cm<sup>3</sup>. Essa redução pode estar relacionada a degradação mais acentuada de componentes da madeira, incluindo hemiceluloses, lignina e extrativos, que podem se decompor e ser liberados durante o tratamento. Essa perda de massa resulta em diminuição na densidade da madeira.

Mania et al. (2020) notaram leve diminuição na densidade da madeira nas temperaturas de 120 a 160°C. A temperatura de 180°C resultou em média de redução de 3,4% na densidade da madeira. Shukla (2019) investigou a modificação térmica de *Acacia auriculiformis* na faixa de 150°C a 240°C sob vácuo, observando maior redução de densidade na temperatura de 240°C,



entre 14% e 15%. Por sua vez, (CALONEGO et al., 2020) relataram que o tratamento térmico da madeira de *Hevea brasiliensis* a 220°C promoveu redução significativa de 4,4% na densidade da madeira juvenil e 3,8% na madeira adulta. A diminuição da massa é desencadeada pela degradação dos polímeros da madeira, especialmente das hemiceluloses, que são componentes mais sensíveis. Essas variações na densidade estão diretamente relacionadas às mudanças químicas resultantes da degradação dos extrativos e dos componentes da parede celular durante o tratamento térmico (CALONEGO et al., 2020).

### 2.3.3. Higroscopicidade e instabilidade dimensional

A água está presente na madeira tanto na forma de água líquida quanto na forma de vapor e pode ser basicamente dividida em duas categorias: água livre ou capilar e água de impregnação ou de adesão. A primeira encontra-se nas cavidades celulares, sujeita a forças capilares, enquanto a segunda está aderida às ligações de hidrogênio dos grupos hidroxílicos, principalmente nas cadeias de celulose e hemicelulose, e em menor extensão nos grupos hidroxilos da lignina (SIAU, 1983; SKAAR; SIAU, 1981).

A umidade da madeira em equilíbrio diminui à medida que a temperatura aumenta, especialmente em temperaturas superiores a 100°C. Essa redução pode variar conforme a temperatura e o tempo de exposição a que a madeira foi submetida (TOMASELLI; BINDER, 1981).

Stamm e Hansen (1937) relataram que a higroscopicidade, que representa a capacidade da madeira em absorver ou liberar água em resposta às variações no ambiente, da madeira de *Nyssa sylvatica* foi reduzida pela metade quando os corpos de prova foram tratadas a 205°C por 6 horas. Em outro estudo, aumentos na temperatura, tempo de tratamento e técnicas utilizadas resultaram em reduções na instabilidade dimensional de 45% para 10% (YILDIZ, 2002)

As principais mudanças estruturais na madeira modificada termicamente são a redução da hidrofiliabilidade e da densidade devido à evaporação progressiva dos extrativos e à degradação térmica dos principais componentes químicos (POCKRANDT et al., 2018). A redução da hidrofiliabilidade, ou seja, a capacidade de absorção de água, e a densidade mais baixa são características que trazem potencial para novas aplicações, especialmente em casos em que a resistência ao apodrecimento e a menor instabilidade dimensional são cruciais (NHACILA et al., 2020).

No estudo de Lengowski (2011), redução significativa na variação tangencial foi observada: 77,86%, 63,62% e 31,38% para *Tectona grandis*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, respectivamente, após o tratamento a 160°C. A autora afirmou que o tratamento térmico levou a redução da umidade de equilíbrio de 11,51% para *Eucalyptus grandis*, 16,56% para *Pinus taeda* e declínio mais acentuado para *Tectona grandis* em 42,39%, resultando em melhoria da higroscopicidade e estabilidade dimensional.

Batista (2012) avaliou as propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente pelo processo VAP HolzSysteme® em temperaturas de 140°C, 160°C e 180°C. Foram observadas alterações significativas nas propriedades da madeira termicamente modificada. A higroscopicidade diminuiu consideravelmente, com redução de 44,11% na temperatura de 180°C e redução menor de 14,04% na temperatura de 140°C.

Calonego et al. (2020) demonstraram que a madeira juvenil de *Hevea brasiliensis* modificada termicamente a 220°C apresentou reduções de 28,59%, 21,94%, 33,33% e 56,45% nos valores dos intumescimentos volumétricos, tangenciais, radiais e axiais lineares, respectivamente, em comparação com a madeira não tratada. Para a madeira adulta de *Hevea brasiliensis*, o tratamento sob a mesma temperatura resultou em reduções de 18,64%, 19,01%, 13,57% e 35,42% nos valores dos intumescimentos volumétricos, tangenciais, radiais e axiais lineares, respectivamente. Essa melhoria da estabilidade dimensional pode ser atribuída ao aumento do grau de cristalinidade e à ampliação dos cristalitos de celulose, uma vez que o tratamento térmico reduz a quantidade de grupos químicos responsáveis pela absorção de água na madeira, tornando-a menos higroscópica. Além disso, o aumento na cristalinidade da celulose pode resultar em estrutura molecular mais compacta e resistente à absorção de água, contribuindo para a estabilidade dimensional da madeira (BÄCHLE et al., 2010; KOROŠEC et al., 2009).

#### 2.3.4. Módulo de elasticidade (MOE)

O Módulo de Elasticidade (MOE) da madeira é uma propriedade importante que pode ser influenciada pelo tratamento térmico. Estudos têm indicado que há ligeiro aumento no MOE quando a madeira é submetida a tratamento térmico por curtos períodos. No entanto, essa tendência pode ser revertida em faixas de temperatura mais elevadas e tempos de exposição prolongados (HILL, 2006).

Lengowski (2011) observou queda de 11,77% e 18,25% no MOE na resistência à flexão estática para as espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, respectivamente. No entanto, para a madeira de *Tectona grandis*, houve aumento de 19,51% no MOE.

Tankut, Tankut e Zor (2014) investigaram o efeito do tratamento térmico em várias espécies, incluindo *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Chlorophora excelsa*, *Picea orientalis* e *Fraxinus excelsior*, e observaram redução média de cerca de 19% no módulo de elasticidade. Eles associaram esses resultados à diminuição da umidade de equilíbrio da madeira, à degradação dos componentes e à volatilização dos extrativos.

Icel e Beram (2017) estudaram os efeitos do tratamento térmico industrial na madeira de *Chlorophora excelsa*. Eles observaram reduções significativas ( $p < 0,05$ ) no MOE, variando de 15,7% a 27,8% a temperatura de 190°C por período de 2 horas. A maior redução na resistência ocorreu no MOE.

Mania et al. (2020) estabeleceram parâmetros de tratamento térmico para a madeira de *Picea abies* a fim de otimizar o módulo de elasticidade dinâmico para desempenho acústico. Eles relataram que o tratamento térmico nas temperaturas de 120 a 160°C resultou em aumento de 6% nos valores do MOE. No entanto, a temperatura de 180°C, houve redução de 4,3% no MOE. Os autores explicaram que o aumento do MOE e a diminuição da densidade causados pela modificação térmica nessa faixa de temperatura, resultaram em madeira com boa ressonância sonora e melhorias nas propriedades acústicas.

Em estudo com madeira de *Pinus radiata*, Fu et al. (2020) utilizaram temperaturas de 185°C, 200°C, 215°C e 230°C. Eles observaram que o MOE variou com o aumento da temperatura do tratamento, com o valor mais alto de 11 GPa, observado a 200°C, e depois diminuiu com temperaturas mais elevadas, chegando ao valor mínimo de 9,5 GPa a 230°C.

Nhacila et al. (2020) investigaram as propriedades mecânicas das espécies *Brachystegia spiciformis* e *Julbernardia globiflora* em temperaturas de 215°C, 230°C e 245°C por 2 horas. Eles relataram diminuição nas propriedades mecânicas com a intensidade do tratamento. Os valores do MOE reduziram em 10,2% para *B. spiciformis* e 6% para *J. globiflora*. Os autores concluíram que, com a modificação térmica, o MOE e a resistência à compressão paralela à grã da madeira geralmente diminuem menos que a resistência à flexão, ou até mesmo podem aumentar, embora a fragilidade possa aumentar.

### 2.3.5. Módulo de ruptura (MOR)

A modificação térmica da madeira leva a mudanças permanentes em sua estrutura. Mesmo em períodos curtos de tratamento, o módulo de ruptura (MOR) não parece sofrer aumento. Isso ocorre porque o MOR é, na verdade, a tensão equivalente nas fibras no ponto de ruptura e, como tal, está relacionado à resistência final à flexão da madeira (DINWOODIE, 2000).

Tankut; Tankut; Zor (2014) investigaram o efeito do tratamento térmico em várias espécies, incluindo *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Chlorophora excelsa*, *Picea orientalis* e *Fraxinus excelsior*, e observaram redução média de cerca de 24% no módulo de ruptura. Eles atribuíram essa redução à degradação das hemiceluloses, que causam reações transversais na substância matriz e na cristalinidade das microfibrilas e matrizes.

Lengowski (2011) relatou quedas significativas no MOR: 34,13%, 48,56% e 49,82% para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*, respectivamente. A autora observou que a madeira se torna mais quebradiça devido à deterioração das propriedades de fratura resultante da perda de polissacarídeos amorfos.

No estudo de Fu et al. (2020) com madeira de *Pinus radiata*, foi observado que o MOR variou com a intensidade do tratamento, exceto para o grupo a 200°C. A temperatura de 185°C, houve redução de 20 MPa em comparação com a madeira não tratada. A 200°C, foi relatado aumento de 65 MPa em relação ao grupo anterior. A partir dessa temperatura, houve redução significativa do MOR com a intensidade, atingindo valores de 50 MPa e 40 MPa para os grupos de 215°C e 230°C, respectivamente. Os autores explicaram que esses resultados podem ser interpretados como efeito da degradação das hemiceluloses, que é menos resistente a altas temperaturas que a celulose e a lignina.

## 2.4. Colorimetria

A cor da madeira é uma propriedade importante para os consumidores finais, que muitas vezes a valorizam do ponto de vista decorativo. A preferência pela cor da madeira pode variar dependendo do mercado, das áreas de aplicação, das tendências ou da moda (BUSH, 2008). Equipamentos que permitem a reprodução e medição precisas de cores estão se tornando cada vez mais relevantes para atender à demanda por produtos de madeira de melhor qualidade. A colorimetria, como técnica não destrutiva, objetiva e precisa, tem se destacado como método para determinar a cor da madeira (GRIEBELER et al., 2018; JANIN et al., 2001).

O sistema CIELAB de 1976, que avalia os parâmetros colorimétricos: luminosidade ou brilho ( $L^*$ ), tonalidade ou matiz ( $a^*$ ) e saturação ou cromaticidade ( $b^*$ ), tem se mostrado eficiente para determinar a cor de várias espécies de madeira (AUTRAN; GONÇALEZ, 2006). A coordenada  $L^*$  representa a luminosidade, variando de zero (preto) a 100 (branco), enquanto  $a^*$  e  $b^*$  representam as coordenadas cromáticas, variando entre -60 e +60. A saturação ou cromaticidade ( $C$ ) é a distância radial entre a cor e o centro do espaço, relacionada à concentração do pigmento. A tonalidade ou ângulo de matiz ( $h^*$ ) define a cor em si. No sistema CIELAB, sinais positivos e negativos significam:  $+a^*$  aumento da cor vermelha,  $-a^*$  aumento da cor verde,  $+b^*$  aumento da cor amarela e  $-b^*$  aumento da cor azul, representando tonalidades (COMMISSION INTERNACIONALE DE L'ECLAIRAGE, 2004).

De acordo com González et al. (2001), o sistema CIELAB proporciona distribuição de cores mais uniforme, permitindo melhor caracterização da cor do material. O uso de coordenadas cromáticas possibilita a classificação de madeiras em grupos de tonalidades, facilitando sua aquisição e uso específico. Amorim, González e Camargos (2013) caracterizaram as madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* por meio da colorimetria e concluíram que a propriedade melhor estimada por essa técnica foi a densidade, seguida pelo módulo de elasticidade e módulo de ruptura. A modificação térmica pode levar a várias alterações químicas que afetam a coloração da madeira, e a colorimetria é uma ferramenta usada para avaliar, medir e comparar essas alterações (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018).

Griebeler (2013) avaliou as variações colorimétricas da madeira de *Eucalyptus grandis* após ser submetida a temperaturas de 140, 160 e 180°C. Os valores do parâmetro  $L^*$  diminuíram à medida que as temperaturas de tratamento térmico aumentaram. A redução de  $L^*$  foi de 14,5% a 140°C, 37,6% a 160°C e quase 50% a 180°C. A diminuição de  $L^*$  está diretamente relacionada ao escurecimento da cor da madeira.

Sikora et al. (2018) investigaram as alterações de cor na madeira de *Picea abies* devido ao tratamento térmico e observaram que o valor de  $b^*$  (associado à cor amarela e azul) apresentou aumento significativo de aproximadamente 35% a 160°C e 180°C. Entretanto, esse aumento foi seguido por redução significativa de até 45% quando a madeira foi submetida ao tratamento térmico a 210°C. Essas variações colorimétricas destacam a influência da temperatura no comportamento cromático da madeira e têm implicações importantes para aplicações que dependem da estética da madeira.

Em estudo de Fu et al. (2020) com a madeira de *Pinus radiata*, foi observado que o valor de  $L^*$  das amostras diminuiu à medida que a temperatura de tratamento aumentou. No controle,

o valor de  $L^*$  foi de 74,1, enquanto para o grupo de 230°C, o valor caiu para 40,62. O valor de  $a^*$  aumentou de 5,31 no controle para 9,24 no grupo de 215°C e depois diminuiu para 8,63 no grupo de 230°C. O valor de  $b^*$  aumentou de 17,59 no controle para o grupo de 185°C e, em seguida, diminuiu com a intensidade do tratamento para 13,01 no grupo de 230°C. Os autores explicaram que o aumento do vermelho e do amarelo está relacionado às reações de degradação, condensação e oxidação da lignina durante o tratamento térmico, que produzem novas substâncias coloridas, alterando os grupos cromóforos. A redução do valor de  $a^*$  foi interpretada como a volatilização dos compostos fenólicos, e a diminuição de  $b^*$  pode ser atribuída à volatilização de fenóis de baixo peso molecular originados da lignina.

## 2.5. Redes neurais artificiais (RNA's)

A quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, representa uma transformação significativa nos paradigmas industriais anteriores. Seu foco está na aplicação de tecnologias de conectividade para melhorar os processos de produção, e a inteligência artificial (IA) desempenha papel central nessa revolução (CAVALCANTE, 2019). A inteligência artificial está sendo cada vez mais desenvolvida e aplicada em diversas áreas, proporcionando aos pesquisadores ampla gama de opções tecnológicas para criar soluções inovadoras.

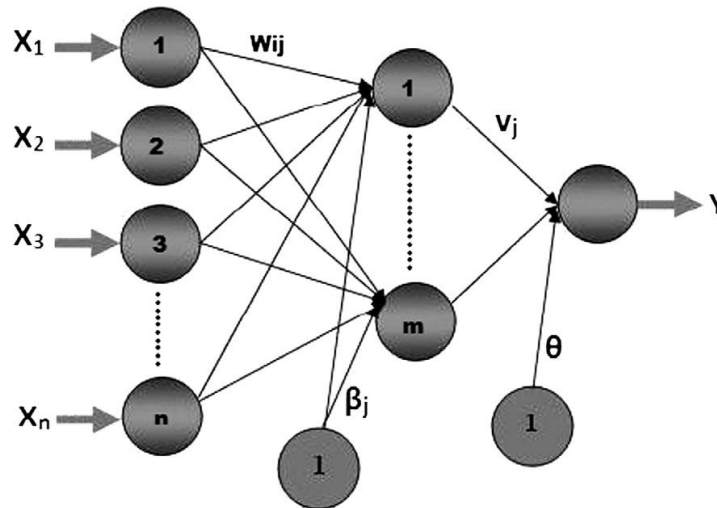
As redes neurais artificiais (RNA) são ferramentas computacionais que buscam simular a estrutura ou a função das redes neurais biológicas (TIRYAKI; ÖZŞAHIN; AYDIN, 2017). As RNA têm ampla gama de aplicações na engenharia, devido à sua capacidade de previsão, otimização e classificação. Elas são capazes de aprender relações entre entradas e resultados sem a necessidade de conhecimento prévio sobre o problema em questão (BURATTI; BARELLI; MORETTI, 2013).

As RNA são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples, que realizam funções matemáticas, geralmente não-lineares. Essas unidades são organizadas em uma ou mais camadas, interconectadas por muitas conexões, geralmente unidirecionais (BRAGA; LUDERMIR; CARVALHO, 2000)

O Perceptron Multicamadas (MLP) é um tipo comum de RNA, amplamente utilizado na ciência da madeira (NASIR et al., 2019a; TIRYAKI; HAMZAÇEBI, 2014). Ele é constituído por uma camada de entrada, que recebe dados externos, uma camada de saída, que apresenta os resultados da rede, e uma ou mais camadas intermediárias, conhecidas como camadas ocultas

(HAMZAÇEBI; AKAY; KUTAY, 2009). Tiryaki e Hamzaçebi (2014) apresentaram uma estrutura típica de um MLP, conforme ilustrado na Figura 1. O número de camadas e neurônios é determinado previamente por tentativa e erro ou por meio de técnicas de otimização.

Figura 1. Estrutura típica de uma Multi-Layer Perception (MLP)



Fonte: Tiryaki e Hamzaçebi (2014).

A rede neural artificial tem se estabelecido como ferramenta matemática crucial na área de ciência e tecnologia da madeira, sendo amplamente aplicada para fins de classificação e previsão. Diversos estudos têm explorado seu potencial em diversas aplicações relacionadas à madeira, como:

- i. **Identificação da madeira:** As redes neurais artificiais têm sido usadas para a identificação de diferentes tipos de madeira. Esteban; Fernández; Palacios (2009), Lopes; Bobadilha; Grebner (2020), e Lopes; Burgreen; Entsminger (2020) são exemplos de pesquisas que utilizaram RNA para classificar e identificar espécies de madeira com base em características específicas.
- ii. **Previsão de propriedades físicas e mecânicas:** A capacidade das redes neurais em aprender relações complexas entre entradas e saídas tem sido aproveitada para prever propriedades físicas e mecânicas da madeira. Iliadis et al. (2013) usaram RNA para prever a densidade da madeira. Avramidis e Iliadis (2005) aplicaram RNA para prever a condutividade térmica e a umidade de equilíbrio da madeira. Propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e módulo de ruptura também têm sido previstas por meio

de redes neurais artificiais, conforme demonstrado por diversos estudos, incluindo Esteban, Fernández e Palacios (2009), Fernández et al. (2008), Fu et al. (2020), Nasir et al. (2019) e Tiryaki e Hamzaçebi (2014).

Esteban, Fernández e Palacios (2009) determinaram o MOE da madeira de *Abies pinsapo* aplicando RNA, usando parâmetros de densidade, largura, espessura, umidade, velocidade de propagação da onda ultrassônica e classificação visual dos corpos de prova como valores de entrada. O valor de  $R^2$  nos conjuntos de testes foi de 0,75, indicando que a rede obtida no estudo explica pelo menos 75% dos dados observados.

Tiryaki e Hamzaçebi (2014) abordaram a predição do MOE e do MOR por meio de RNA's de madeira termicamente tratada de *Picea orientalis* em temperaturas de 125°C, 150°C, 175°C e 200°C, durante 3h, 5h, 7h e 9h. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, os erros médios percentuais para os conjuntos de dados de treinamento, validação e teste foram, respectivamente, de 0,74%, 1,01% e 1,04% na predição dos valores para MOR, e 1,14%, 2,21% e 2,12% na predição de valores para MOE.

Nasir et al. (2019) utilizaram parâmetros colorimétricos como variáveis de entrada para prever a densidade, porosidade e absorção de água da madeira de *Tsuga heterophylla* tratada termicamente. Os autores encontraram coeficientes de correlação cruzada com valores de  $R^2$  de 0,943 e 0,950 para os dados de treinamento e teste, respectivamente, para os coeficientes de inchamento da madeira. Para a umidade de equilíbrio, os valores foram de 0,833 e 0,840 para os dados de treinamento e teste, respectivamente. Quanto à densidade, os valores de  $R^2$  foram de 0,430 e 0,404 para os dados de treinamento e teste, respectivamente.

Fu et al. (2017) desenvolveram um modelo de RNA para prever a deformação elástica em discos de *Betula platyphyla* durante a secagem, com base em temperatura, umidade de equilíbrio, umidade relativa e distância da medula. Os valores de  $R^2$  obtidos foram superiores a 0,97: 0,96 e 0,95 para os conjuntos de treinamento, validação e teste, respectivamente.

Fu et al. (2020) avaliaram o MOE e MOR do tratamento térmico de *Pinus radiata* por meio de modelos de RNA baseados em mudanças nos valores colorimétricos. Os autores relataram correlações significativas entre os valores medidos e preditos em todo o conjunto de dados. Os valores de  $R^2$  foram maiores que 0,904 em todos os conjuntos de dados para o modelo de predição do MOE, indicando que o modelo de rede estabelecido é capaz de explicar mais de 90,4% dos valores medidos. No modelo de predição de MOR, os valores de  $R^2$  nos conjuntos de dados de treinamento, validação e teste foram 0,878, 0,806 e 0,783, respectivamente, demonstrando que o modelo de predição para MOR obteve mais de 78,3% de sucesso.

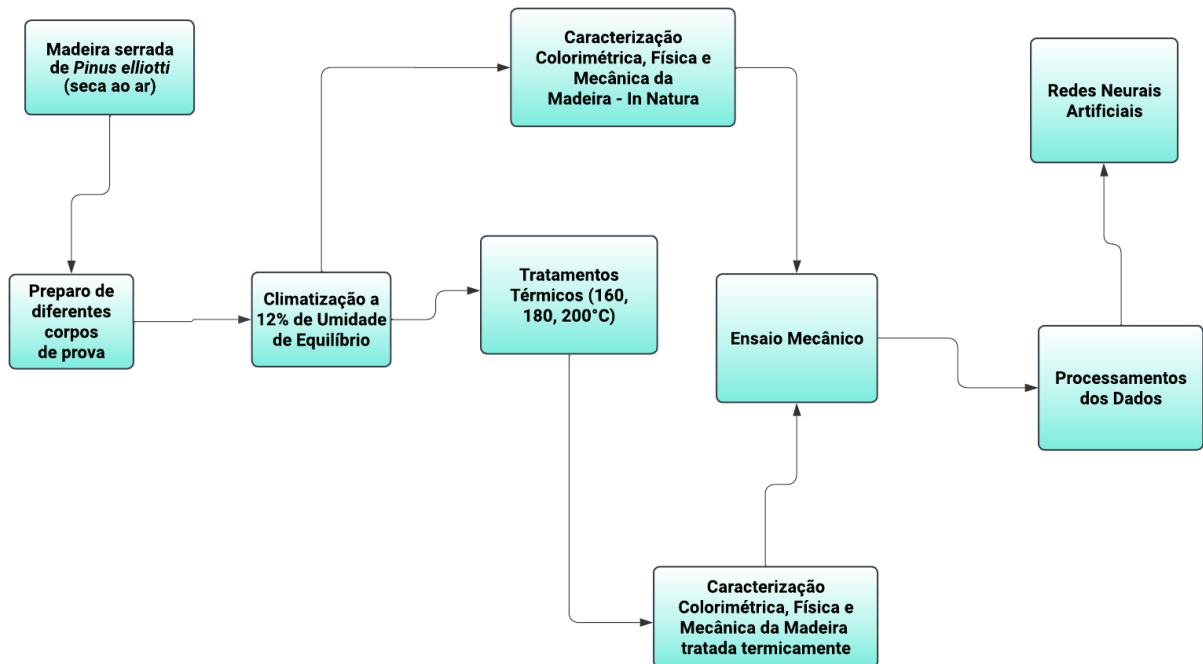




### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Na condução deste estudo, foram seguidas diversas etapas metodológicas, cuja representação está presente na Figura 2.

Figura 2. Etapas realizadas no trabalho



Fonte: Do Autor (2024)

#### 3.1. Obtenção e processamento do material

A espécie utilizada para este estudo foi *Pinus elliotti* Engeml (Pinus), com 20 anos de idade, proveniente do plantio experimental da Universidade Federal de Lavras (21°22'32" de latitude sul e 44°97'77" de longitude oeste, altitude de 887 m). Foram abatidas três árvores em junho de 2018. As toras foram desdobradas e serradas até obter peças nas dimensões 500 x 150 x 50 mm, orientados nas direções axial, tangencial e radial, respectivamente. Vale ressaltar que este material foi remanescente da pesquisa de Guedes (2020). Posteriormente, no Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA) as peças foram redimensionadas nas dimensões de 280 x 20 x 20 mm e selecionado apenas os corpos de provas livres de defeitos, sendo sem fissuras e nós.

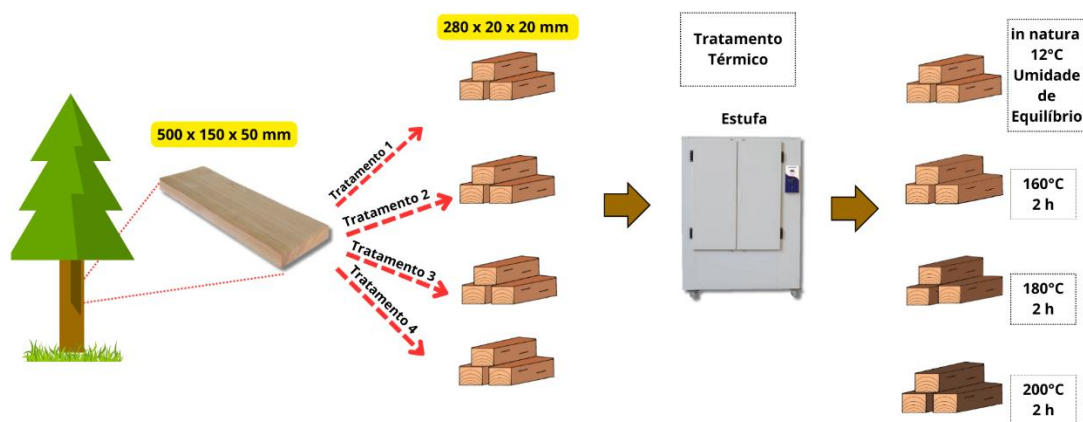
Posteriormente, foram realizadas a pesagem dos corpos de prova antes de realização de qualquer tratamento e, ou outra análise, sendo considerada a condição da madeira “in natura”.

### 3.2. Tratamento térmico

O experimento foi conduzido em estufa com circulação de ar controlada, localizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Ciência Florestal (DCF/UFLA). Noventa corpos de prova, distribuídos igualmente em grupos, foram submetidos a temperaturas de 160°C, 180°C ou 200°C por período de 2 horas cada (Figura 3). Adicionalmente, trinta corpos de prova foram selecionados para servirem como testemunhas, representando a madeira não submetida ao tratamento térmico, totalizando cento e vinte corpos de prova no experimento.

O processo de modificação térmica foi dividido em etapas, incluindo os períodos de secagem, aquecimento, tratamento térmico efetivo e resfriamento. O tratamento térmico teve início na temperatura inicial de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , sendo mantida até atingir a estabilização da massa dos corpos de prova. Em seguida, a temperatura foi ajustada para os níveis específicos de cada tratamento (160°C, 180°C ou 200°C), mantida por período de 2 horas. Após a etapa de tratamento, a estufa foi desligada e os corpos de prova permaneceram dentro dela até alcançarem a temperatura ambiente.

Figura 3. Tratamento térmico da madeira de *Pinus elliotti*



Fonte: Do Autor (2021)

### 3.3. Perda de massa

De acordo com a metodologia proposta por Wentzel et al. (2019), foi determinada a perda de massa decorrente dos tratamentos térmicos. Para isso, foram medidas as massas dos corpos de prova antes da secagem inicial a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  (massa inicial) e após o resfriamento de cada tratamento térmico (massa final).

$$\text{Perda Massa Padronizada} = \frac{\text{Massa inicial} - \text{Massa após tratamento térmico}}{\text{Massa inicial}} \times 100$$

### 3.4. Análise colorimétrica

Seguindo a metodologia proposta por Fu et al. (2020), seis pontos na superfície tangencial de cada corpo de prova foram marcados. Em seguida, foram medidos os padrões colorimétricos das coordenadas verticais  $L^*$  (luminosidade), cromáticas  $a^*$  e  $b^*$  (coordenadas cromáticas nos eixos verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente), que são grandezas adimensionais definidas pelo sistema Commission Internationale de l'Eclairage - CIElab 1976 (CIE, 2007). A partir dos valores de  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , foram calculadas as diferenças de luminosidade ( $\Delta L^*$ ) e coordenadas de croma ( $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ ), bem como o ângulo de matiz ( $h^*$ ), a saturação ( $C^*$ ) e a variação total de cor ( $\Delta E$ ), conforme expresso pelas equações 1, 2 e 3 do sistema CIELAB 1976:

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

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})^2} \quad (2)$$

$$h^* = \tan^{-1} \left( \frac{a^*}{b^*} \right) \quad (3)$$

Em que:

$\Delta E$  = representa variação total de cor (adimensional);

$\Delta L$  = variação da luminosidade (claro e escuro);

$\Delta a$  = variação em vermelho e verde (+a indica vermelho e -a indica verde);

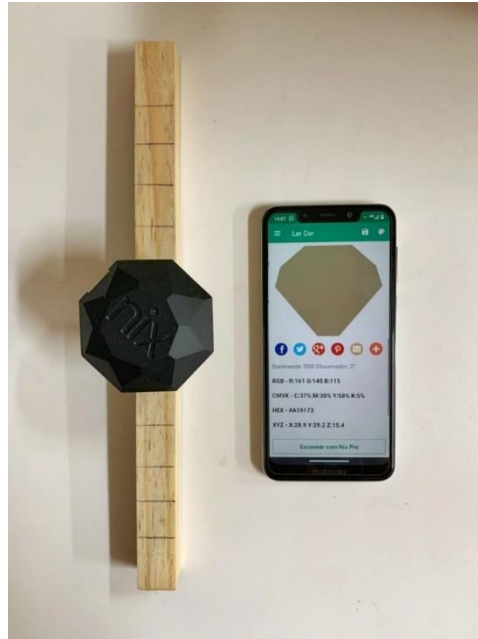
$\Delta b$  = variação em azul e amarelo (+b indica amarelo e -b indica azul);

$C^*$  = saturação;

$h^*$  = ângulo de matiz ou tonalidade.

A análise colorimétrica foi realizada no Departamento de Ciência de Alimentos (DCA/UFLA) com uso do Colorímetro Nix Color Sensor™ (Figura 4). Esse colorímetro é equipado com sensor de cores Nix Color, com diodo emissor de luz (LED) e possui pequena concavidade que, ao entrar em contato com a superfície dos corpos de prova, previne interferências externas nas análises.

Figura 4. Colorímetro nix color sensortm



Fonte: Do Autor (2021)

As leituras foram feitas em todos os corpos de prova. Inicialmente, realizaram-se as leituras nos corpos de prova “in natura” e após cada tratamento térmico. Todas as leituras foram realizadas na umidade de 12%.

### 3.4. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram avaliadas de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma BS 373-57 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1957), a partir dos quais foram determinados os Módulos de Elasticidade (MOE) e de Ruptura (MOR) em ensaios de flexão estática, utilizando a máquina universal de teste mecânico. Para cada tratamento térmico e para as testemunhas, foram empregados trinta corpos de prova com dimensões de 280 x 20 x 20 mm (Axial x Tangencial x Radial, respectivamente). Os ensaios foram realizados nas faces tangenciais dos corpos de prova, com a madeira em equilíbrio de umidade de 12%.

### 3.5. Análise estatística

A análise estatística envolveu a agrupação dos dados de acordo com cada tratamento e variável estudada. A fim de verificar a normalidade da distribuição de probabilidades dos resíduos, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk ( $p > 0,05$ ). A homogeneidade das variâncias foi avaliada por meio do teste de Fligner ( $p > 0,05$ ).

Quando os dados não atenderam à normalidade, adotou-se a transformação de Box-Cox. Caso contrário, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi empregado, seguido do teste de

post-hoc de Dunn para realizar comparações múltiplas não paramétricas entre os diferentes tratamentos. Em situações em que a distribuição dos dados era normal, a estatística paramétrica de Análise de Variância (One Way Analysis of Variance,  $p > 0,05$ ) foi aplicada.

No caso de diferença significativa entre o grupo controle e os tratamentos térmicos, o teste de Tukey ( $p > 0,05$ ) foi utilizado. Quando os dados eram normais, a média foi empregada como medida de tendência central. Para os dados não paramétricos, a mediana foi utilizada.

### **3.6. Análise de componentes principais (PCA)**

Para avaliar as relações entre as variáveis colorimétricas, físicas e mecânicas, bem como reduzir a dimensionalidade dos dados, utilizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA). Inicialmente, as variáveis de interesse, incluindo luminosidade ( $L^*$ ), matiz vermelho ( $a^*$ ), matiz amarelo ( $b^*$ ), saturação de cor ( $C^*$ ), ângulo de tonalidade ( $h^*$ ), umidade da madeira (umid), densidade da madeira (dens), módulo de elasticidade da madeira (moed), e módulo de ruptura da madeira (mor), foram coletadas das amostras e normalizadas, garantindo que todas as variáveis estavam na mesma escala.

Após a normalização, a PCA foi aplicada para identificar os principais componentes que explicam a variabilidade dos dados. Os resultados foram interpretados com base nas cargas das variáveis em cada componente. A seleção dos principais componentes foi realizada considerando a interpretação dos resultados e a quantidade de variabilidade explicada por cada componente. Os principais componentes foram então submetidos a análises adicionais, e os resultados foram visualizados em gráficos para uma compreensão mais aprofundada das relações entre as variáveis colorimétricas, físicas e mecânicas.

### **3.7. Redes neurais artificiais - RNA**

Por meio do algoritmo perceptron multicamadas feedforward (MLP) foram desenvolvidas as Redes Neurais Artificiais (RNAs). As variáveis de entrada utilizadas foram os valores de umidade da madeira em equilíbrio, densidade aparente e os parâmetros colorimétricos da madeira. As variáveis de saída correspondiam ao módulo de elasticidade (MOE) ou ao módulo de ruptura (MOR). Esses dados foram divididos em conjuntos de treinamento (70%) e teste (30%). O software SPSS (v.20) foi empregado para a criação e desenvolvimento das redes.

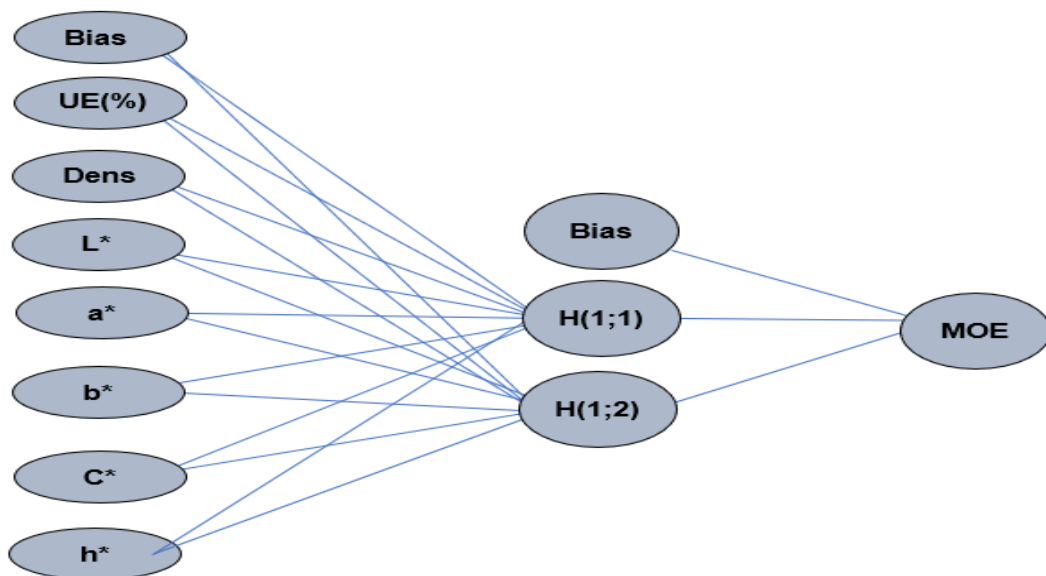
Foram normalizadas as variáveis de entrada para garantir uma escala uniforme e evitar problemas de convergência durante o treinamento da RNA. A divisão dos dados em conjuntos de treinamento e teste foi realizada para avaliar o desempenho do modelo em dados não vistos.

### 3.7.1. Estrutura das redes neurais artificiais

As estruturas das RNAs foram configuradas com diferentes combinações de camadas ocultas (1 ou 2) e neurônios (1 a 6). A RNA1 foi projetada com dois neurônios na camada oculta e um neurônio na camada de saída, representando a variável resposta (MOE). Para a RNA2, foram implementados quatro neurônios na camada oculta e um neurônio na camada de saída, correspondendo à variável resposta (MOR).

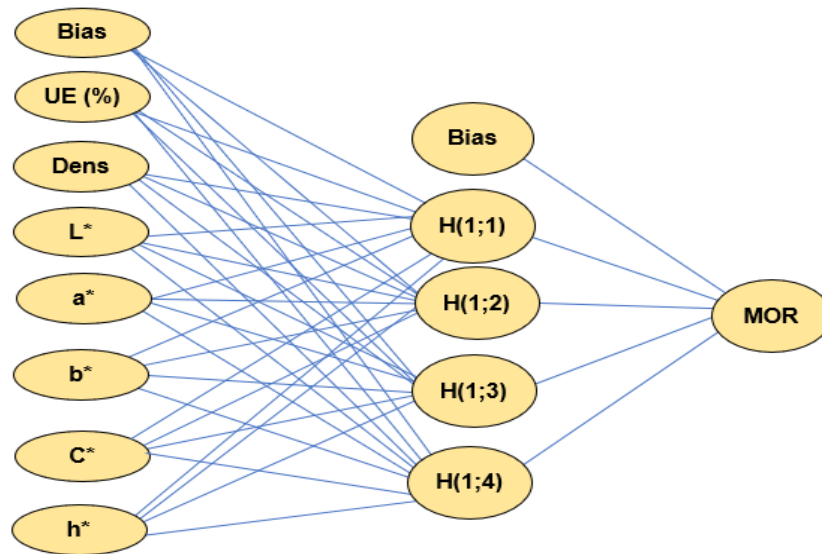
O número máximo de épocas definido para cada RNA foi de 100. Os diagramas das RNAs projetadas para a predição do MOE e do MOR estão ilustrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Figura 5. Diagrama da RNA projetada para predição do módulo de elasticidade.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 6. Diagrama da RNA projetada para predição do módulo de ruptura.



Fonte: Do autor (2021)

Cada neurônio foi alocado em uma camada oculta, enquanto a camada de saída correspondeu à função de ativação. Neste estudo, a função de ativação escolhida para as camadas ocultas foi a tangente hiperbólica sigmoideal, enquanto a função de ativação utilizada para a camada de saída foi a softmax. Os detalhes gerais sobre a RNA, usada para prever o Módulo de Elasticidade (MOE) ou o Módulo de Ruptura (MOR) com base nas principais propriedades físicas e parâmetros colorimétricos, estão resumidos na Tabela 1.

### 3.6.2. Avaliação do desempenho das redes neurais

Para avaliar o desempenho das Redes Neurais Artificiais (RNAs) desenvolvidas, foram utilizadas duas métricas comuns: o Erro Médio Quadrático (RMSE) e o Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE). Isso permitiu uma avaliação objetiva da capacidade preditiva do modelo em dados não utilizados durante o treinamento.

O RMSE mede a média das diferenças ao quadrado entre os valores previstos e os valores reais, com a raiz quadrada sendo tirada para obter uma métrica na mesma escala dos dados originais, conforme Equação 5.

Tabela 1. Informações das redes neurais artificiais para prever o módulo de ruptura (MOR) da madeira tratada termicamente de *Pinus elliotti* com base nas principais propriedades físicas e parâmetros colorimétricos

Variáveis	Informações	
	RNA 1	RNA 2



Camada de Entrada		
Covariável 1	Umidade em Equilíbrio	Umidade em Equilíbrio
Covariável 2	Densidade	Densidade
Covariável 3	L*	L*
Covariável 4	a*	a*
Covariável 5	b*	b*
Covariável 6	C*	C*
Covariável 7	h*	h*
Nº de Unidades	7	7
Método de reescalonamento para covariáveis	padronizado	padronizado
Camada Oculta		
número de camadas ocultas, $N$	1	1
número de unidades na primeira camada oculta	2	4
função de ativação	tangente hiperbólica	tangente hiperbólica
Camada de Saída		
variáveis dependentes	MOE	MOR
número de unidades, $N$	1	1
função de ativação	softmax	softmax
função de erro	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados

Fonte: Dados do Autor (2021)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (5)$$

Em que:

$n$  = número total de observações.

$Y_i$  = valor real de observação  $i$ .

$\hat{Y}_i$  = valor previsto da observação  $i$ .

O RMSE foi empregado para mensurar a dispersão dos erros entre os valores preditos pelas RNAs e os valores reais. Quanto menor o valor do RMSE, mais precisa é a previsão da RNA em relação aos dados reais.

O MAPE foi usado para determinar o erro percentual médio entre as previsões da RNA e os valores reais. O MAPE expressa o erro médio como porcentagem dos valores reais, proporcionando compreensão direta da magnitude do erro em relação ao tamanho das observações (Equação 6).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \times 100 \quad (6)$$

Em que:

$n$  = número total de observações

$Y_i$  = valor real de observação  $i$ .

$\hat{Y}_i$  = valor previsto da observação  $i$ .

Ambas as métricas, RMSE e MAPE, são amplamente aceitas para avaliação do desempenho de modelos de previsão, fornecendo visão abrangente sobre a precisão e a qualidade das previsões realizadas pelas RNAs desenvolvidas.

### 3.6.3. Conjuntos covariáveis para RNA

Foi estabelecido como entradas do modelo (covariáveis) os valores de umidade de equilíbrio, densidade aparente e os parâmetros colorimétricos. Já a saída do modelo foram o módulo de elasticidade – MOE (RNA1) ou módulo de ruptura – MOR (RNA2). Para ambos os modelos, sete variáveis explicativas (umidade de equilíbrio, densidade aparente,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$ ) foram consideradas para treinamento da RNA para prever o MOE ou MOR, conforme observado anteriormente na Tabela 1.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Umidade da madeira em equilíbrio

Os valores máximos, médios e mínimos da umidade das madeiras em equilíbrio (UEM%) juntamente com os coeficientes de variação (%) correspondentes aos corpos de prova que passaram pelo tratamento térmico, comparados com aqueles “in natura (não tratados), encontram na Tabela 2. Observa-se que o valor mínimo registrado para a umidade da madeira em equilíbrio foi de 5,1%, obtido a temperatura de 200°C. Por outro lado, o maior valor de umidade da madeira em equilíbrio, de 7,5%, foi apresentado pelos corpos de prova “in natura (não tratados, testemunhas).

Na Tabela 2, pode-se notar que a dispersão dos dados analisados para a umidade da madeira em equilíbrio foi reduzida em todos os tratamentos. A variabilidade dos dados à

temperatura de 180°C excedeu a dos demais tratamentos, com coeficiente de variação de 5,6%. Em contrapartida, a madeira “in natura” (não tratada) demonstrou menor variação nos dados, exibindo coeficiente de variação de 2,5%.

Tabela 2. Valores máximos, médios, mínimos e coeficiente de variação dos dados de umidade da madeira em equilíbrio de *Pinus elliottii*, com ou sem tratamento térmico

Tratamento (°C)	Umidade da madeira em equilíbrio			Coeficiente de Variação (%)
	Máximo	Média	Mínimo	
“In Natura” (Não tratada)	8,2	7,6	7,5	2,5
160	7,9	7,4	6,8	4,6
180	7,2	6,7	6,0	5,6
200	5,9	5,6	5,1	4,3

Fonte: Dados do autor (2024).

Na Tabela 3 encontram-se sumarizados os resultados referentes aos efeitos da temperatura da modificação térmica na umidade em equilíbrio da madeira de *Pinus elliottii*. Pela análise de Kruskal-Wallis, constatou-se que o tratamento térmico exerceu efeito significativo ( $X^2(3) = 81,34$ ;  $p = 2.2 \times 10^{-16}$ ) sobre a umidade da madeira em equilíbrio. A análise de post-hoc de Dunn evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre todos os tratamentos térmicos, exceto para os corpos de prova “in natura” e não submetidos ao tratamento térmico (testemunhas), cuja mediana foi de 7,7, com amplitude interquartil de 0,7. Esses valores não apresentaram diferenças estatísticas em relação ao tratamento térmico a 160°C, que registrou valores de 7,6 e 0,7, respectivamente. Observa-se clara tendência de redução da umidade da madeira à medida que a temperatura do tratamento aumenta (Figura 8). Isso indica que o tratamento térmico desempenhou papel significativo na remoção de umidade da madeira, tornando-a mais seca e, portanto, potencialmente mais estável em termos de variações dimensionais.

Tabela 3. Comparação múltipla das medianas das umidades da madeira em equilíbrio, de *Pinus elliottii*, “In natura” (não tratada) e tratadas termicamente, utilizando o Teste de Kruskal-Wallis, a 5% de significância.

Parâmetros	Umidades da madeira em equilíbrio (%)			
	Tratamentos			
	“In Natura”	160°C	180°C	200°C
Média (Desvio padrão)	7,6 (0,3)	7,4 (0,4)	6,7 (0,4)	5,6 (0,8)
Mediana (Amplitude Interquartil)	7,7 a (0,7)	7,6 a (0,7)	6,7 b (0,6)	5,5 c (0,4)
Percentual de variação	-	-2,1	-12,2	-25,8

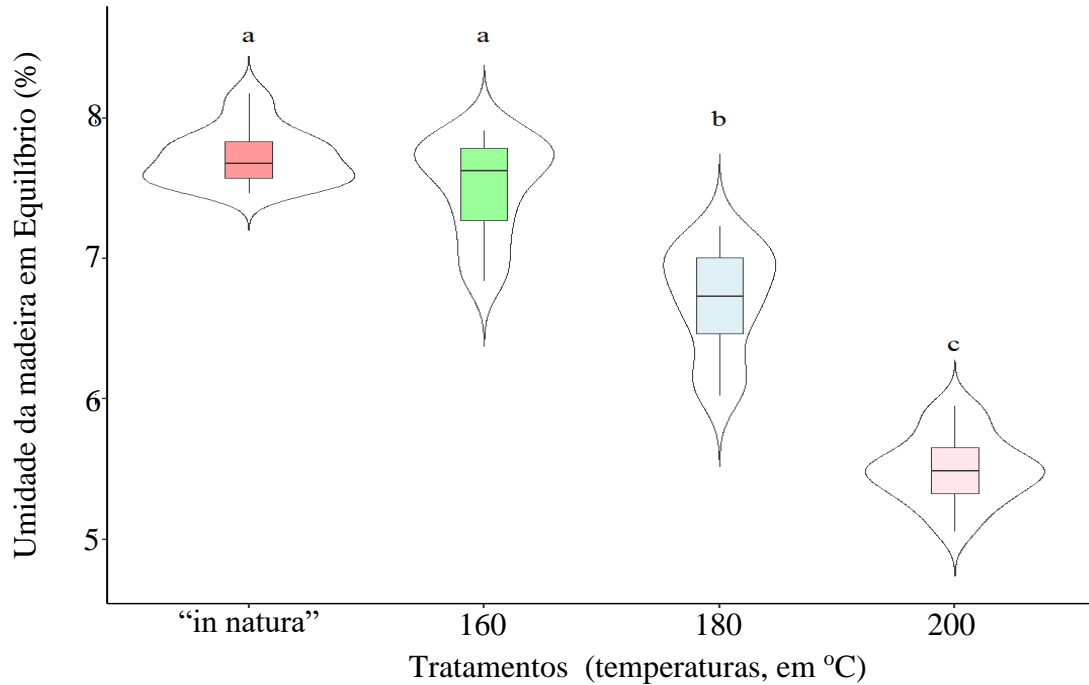
Valores de medianas seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas, a 5% de significância pelo teste de Kruskal-Wallis [ $X^2_{(3)} = 81,34^*$ ,  $p < 0,001$ ].

Fonte: Dados do autor (2024).

É importante ressaltar que a umidade da madeira é considerada fator crítico em várias aplicações, como construção civil e fabricação de móveis, uma vez que a variação na umidade pode levar a deformações e comprometer a integridade estrutural. Portanto, a capacidade de reduzir a umidade por meio do tratamento térmico torna-se vantagem significativa em aplicações práticas.

Além disso, a diminuição progressiva da umidade com o aumento da temperatura do tratamento sugere correlação direta entre esses dois fatores, o que é consistente com estudos anteriores (CALONEGO et al., 2020; MANIA et al., 2020). Isso também pode estar relacionado à remoção de hemiceluloses, que é a fração da madeira mais suscetível à degradação térmica (NUOPPONEN et al., 2004).

Figura 7. Box-plot da redução da umidade em equilíbrio da madeira de *Pinus elliotti*, submetida a diferentes tratamentos térmicos e da madeira “in natura” (não tratada termicamente).



Nota: Valores com letras diferentes indicam diferenças significativas a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024).

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em consonância com os obtidos em outras investigações, como as pesquisas conduzidas por Batista et al. (2018) e Shukla (2019).

#### 4.2. Perda de massa

Os resultados referentes à perda de massa e aos coeficientes de variação dos corpos de prova, em percentual, submetidos a diferentes tratamentos térmicos são apresentados na Tabela 4. Nota-se que a menor perda de massa, correspondente a 1,2%, foi registrada para a madeira tratada a 160°C. Por outro lado, a maior perda de massa, 3,1%, foi observada nas madeiras tratadas na temperatura mais elevada, de 200°C. Os coeficientes de variação para a perda de massa foram superiores a 20%, sendo a maior variabilidade de valores observada no tratamento térmico a 180°C, com coeficiente de variação de 37,4%.

Tabela 4. Valores máximos, médios, mínimos e coeficiente de variação das perdas de massa, da madeira de *Pinus elliotti*, termicamente tratada.

Tratamento (°C)	Perda de Massa (%)			Coeficiente de Variação (%)
	Máximo	Médio	Mínimo	
160	3,2	1,6	1,2	26,5
180	5,0	2,4	1,6	37,4
200	6,7	4,5	3,1	20,5

Fonte: Dados do autor (2024).

O teste de Kruskal-Wallis evidenciou a existência de diferenças significativas entre os tratamentos ( $X^2(2) = 62.412$ ;  $p < 2.802 \times 10^{-14}$ ). A análise post-hoc de Dunn confirmou as diferenças para todos os tratamentos, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação múltipla das medianas dos valores da perda de massa, de *Pinus Elliotti*, não tratadas e tratadas termicamente, pelo teste de Kruskal-Wallis, a 5% de significância.

Tratamento	Valores de Perda de Massa (%)			
	Médias		Medianas	
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Amplitude Interquartil
160°C	1,6	0,2	1,6 a	0,3
180°C	2,4	0,5	2,3 b	0,8
200°C	4,5	0,6	4,5 c	0,9

Valores de medianas seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas, a 5% de significância pelo teste de Kruskal-Wallis ( $X^2(2) = 74.20^{**}$ ,  $p < 0,001$ ).

Fonte: Dados do autor (2024).

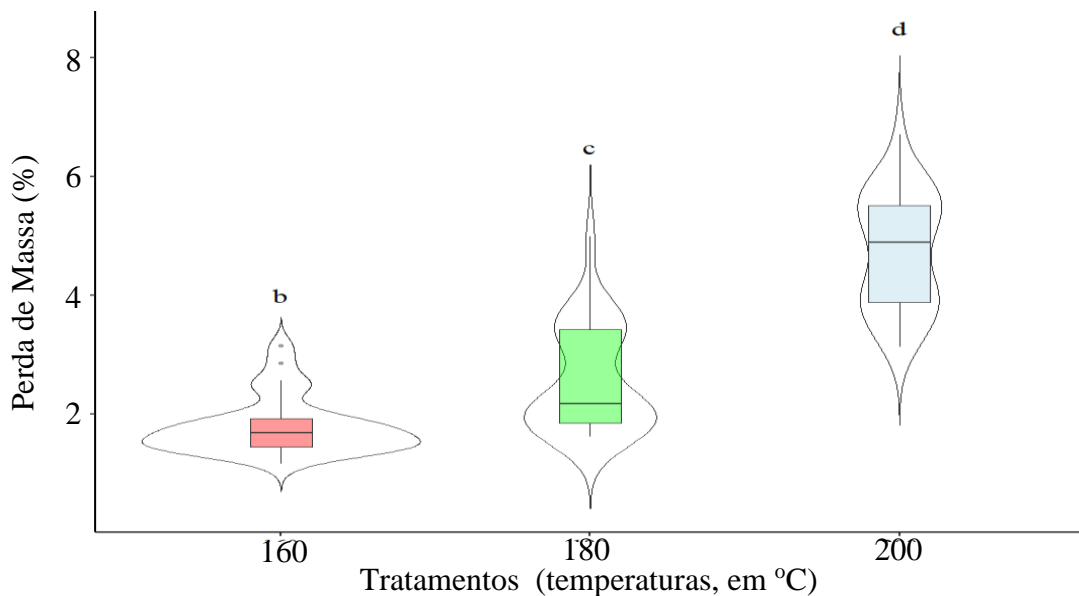
Os resultados das médias, das medianas, dos desvios padrão, dos valores de amplitude interquartil e da análise de diferenças significativas para os valores de perda de massa nos diferentes tratamentos térmicos encontram-se na Tabela 5. A discussão desses resultados fornece insights valiosos sobre o comportamento da madeira de *Pinus elliottii* quando submetida a temperaturas variadas.

Observou-se que a perda de massa média aumentou de forma significativa à medida que a temperatura do tratamento térmico aumentou. O tratamento a 160°C resultou em média de perda de massa de 1,6%, enquanto as temperaturas de 180°C e 200°C apresentaram médias de 2,4% e de 4,5%, respectivamente. Essa tendência de aumento gradual na perda de massa à

medida que a temperatura aumenta está coerente com as alterações químicas e estruturais que ocorrem na madeira durante o tratamento térmico. A degradação de componentes como hemiceluloses e celulose, que são menos estáveis termicamente, resulta na redução de massa.

A análise de medianas reforça a diferença significativa entre os tratamentos. A mediana de perda de massa a 160°C foi de 1,6% e essa diferença se manteve nas temperaturas de 180°C e 200°C, com medianas de 2,3% e 4,5%, respectivamente. A amplitude interquartil, que indica a dispersão dos dados ao redor da mediana, foi maior nos tratamentos com temperaturas mais elevadas, o que sugere variabilidade maior nos resultados de perda de massa nesses tratamentos (Figura 9). A análise de diferenças significativas, realizada pelo teste de Kruskal-Wallis, confirmou a existência de discrepâncias estatisticamente significantes nos valores de perda de massa entre os tratamentos ( $X^2(2) = 74.20^*$ ,  $p < 0,001^*$ ).

Figura 8. Box-plot da redução da massa da madeira de *Pinus elliotti*, submetidos aos três diferentes tratamentos térmicos.



Nota: Valores com letras diferentes indicam diferenças significativas a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024).

Os valores de perda de massa da madeira de *Pinus elliottii*, nas temperaturas de 160°C a 200°C foram comparáveis aos resultados das modificações térmicas de madeiras realizadas por Esteves et al. (2014); Esteves, Domingos e Pereira (2008), Herrera-Builes et al. (2021) e Humar et al. (2020). A perda de massa dentro desse intervalo de temperaturas é atribuída à vaporização de extrativos voláteis e à água adsorvida nas paredes celulares das fibras da madeira. Nesse estágio, não é observada degradação significativa dos componentes poliméricos

da madeira e sim pela ocorrência da reorganização interna da estrutura celular (ANDRADE, 2021; BIZIKS et al., 2015; STAMM, 1956). Essa reorganização pode ser responsável pelas mudanças nas propriedades da madeira também observadas no presente estudo.

Nos estágios iniciais do tratamento térmico, a água adsorvida presente na madeira é expulsa e ocorre redução da massa, enquanto as moléculas dos componentes principais da permanecem relativamente intactas. A medida que a temperatura se eleva para 200°C, observa-se perda de massa mais pronunciada, ocorrendo a liberação de subprodutos da degradação dos componentes, tais como hemiceluloses, extrativos, lignina e celulose (PONCSÁK et al., 2006a). Essa degradação térmica dos componentes da madeira desencadeiam reações químicas, que liberam produtos voláteis, como água, dióxido de carbono, ácidos fórmico e acético (HAKKOU et al., 2005). As transformações químicas são acompanhadas por mudanças nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, como observado no presente estudo. A redução na umidade da madeira afetou sua higroscopicidade e molhabilidade, corroborando com Hill, (2006a). Além disso, a degradação das hemiceluloses pode influenciar diretamente na quebra das ligações polissacarídicas e, conseqüentemente, na redução da resistência mecânica da madeira, como sugerido por Nuopponen et al. (2004) e Tjeerdsma et al. (1998).

### 4.3. Densidade aparente

Os resultados referentes à densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) e aos coeficientes de variação (%) dos corpos de prova, submetidos a diferentes tratamentos térmicos, estão apresentados na Tabela 6. Destaca-se que a densidade aparente mínima observada foi de  $0,307 \text{ g/cm}^3$  para a temperatura de 200°C. Por outro lado, o valor máximo foi de  $0,774 \text{ g/cm}^3$  nos corpos de prova sem tratamento térmico (Tabela 6). É importante notar que a dispersão dos dados para a densidade da madeira tratada a 180°C apresentou coeficiente de variação de 20%, superior aos demais tratamentos.

A análise de variância (ANOVA), de uma via, revelou que a temperatura exerceu influência sobre a média da densidade aparente [ $F(3,116) = 3,841$ ;  $p = 0,0116$ ]. A análise de comparações múltiplas (post-hoc), utilizando o teste Tukey HSD, destacou diferenças significativas apenas entre os valores de densidade aparente do tratamento a 160°C, em comparação aos valores do tratamento a 200°C, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 6. Valores Máximos, Médios, Mínimos e Coeficiente de Variação dos dados de Densidade da Madeira de *Pinus elliottii*, com ou sem tratamento térmico



Tratamento (°C)	Densidade Aparente (g/m <sup>3</sup> )			Coeficiente de Variação (%)
	Máximo	Médio	Mínimo	
Não tratada (testemunha)	0,774	0,575	0,453	14,9
160	0,716	0,616	0,445	11,7
180	0,710	0,539	0,344	20,0
200	0,708	0,526	0,307	19,7

Fonte: Dados do autor (2024)

Os resultados indicaram que a temperatura de 200°C conduziu a redução significativa de aproximadamente 13% na densidade aparente quando comparada ao tratamento térmico a 160°C. Por outro lado, não foram observadas variações estatisticamente significativas na densidade aparente da madeira de *Pinus elliottii* para temperaturas abaixo de 200°C em relação à madeira “in natura (não tratada termicamente). Essa diminuição dos valores da densidade aparente pode ser atribuída à perda de massa e ao decréscimo de volume que ocorrem durante o tratamento térmico. Essa redução no volume pode ser associada a processos de degradação e reorganização estrutural da madeira durante o tratamento, conforme também discutido por Gunduz, Aydmir e Karakas (2009).

Tabela 7. Comparação múltipla das médias dos valores da densidade aparente de *Pinus elliotti*, não tratadas e tratadas termicamente, pelo teste de ANOVA, a 5% de significância.

Tratamento	Valores da Densidade Aparente (g/m <sup>3</sup> )				Percentual de variação
	Médias		Medianas		
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Amplitude Interquartil	
Não tratada (testemunha)	0,575 a b	0,086	0,552	0,136	-
160 °C	0,603 a	0,093	0,619	0,149	4,74
180 °C	0,538 a b	0,108	0,559	0,196	-6,42
200 °C	0,526 b	0,103	0,531	0,131	-8,62

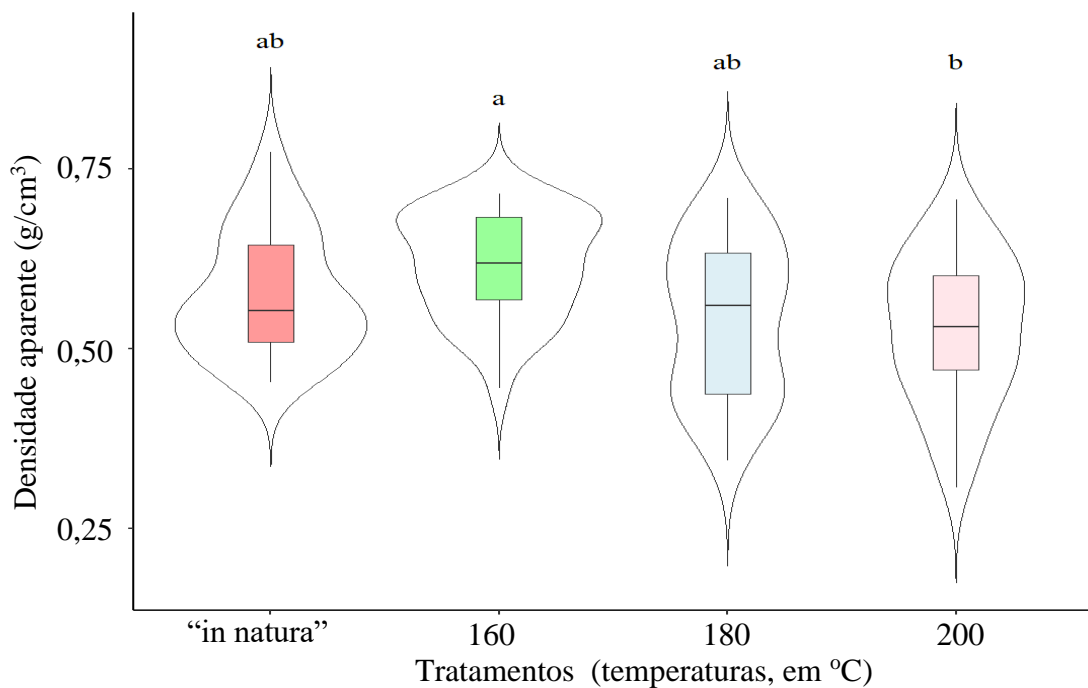
Valores de medianas seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas, a 5% de significância, pelo teste de anova (F= 3,841 p< 0,0116).

Fonte: Do autor (2024).

Os resultados obtidos estão em consonância com pesquisas anteriores. O tratamento a 160°C apresentou aumento próximo de 5%, entretanto, não foi suficiente para ser significativo em relação à madeira não tratada (Figura 10). Isso pode ser explicado pelo fato de que o aumento da densidade em tratamentos térmicos pode estar relacionado à reticulação polimérica da madeira, causada pelas reações da policondensação da lignina.

Além disso, a análise estatística também mostrou diferenças significativas entre as médias de densidade aparente para as temperaturas de 160°C e 200°C. A redução significativa, de 13%, na densidade aparente para a temperatura de 200°C em comparação com a de 160°C pode ser atribuída a efeitos mais intensos de degradação e volatilização de componentes da madeira em temperaturas mais elevadas, o que contribui para a diminuição da densidade aparente.

Figura 9. Box-plot do comportamento da densidade aparente da madeira de *P. ellioti* sob três diferentes tratamentos térmicos e da madeira “in natura”



Nota: Valores com letras diferentes indicam diferenças significativas a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024).

### 4.3. Resistência à flexão estática

#### 4.3.1. Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de ruptura (MOR)

A Tabela 8 apresenta os valores do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) da madeira de *Pinus elliottii* submetida a diferentes tratamentos térmicos, bem como a variabilidade desses valores, expressa pelo coeficiente de variação (CV).

Primeiramente, ao avaliar o módulo de elasticidade, nota-se que a madeira "in natura" apresenta valor médio de aproximadamente 13.524 MPa. À medida que a temperatura de tratamento térmico aumenta, observa-se aumento progressivo nesse valor médio, atingindo cerca de 18.070 MPa a 160°C, o que representa aumento significativo de aproximadamente 34% em relação à madeira não tratada. No entanto, à medida que a temperatura se eleva, a 180°C e 200°C, o módulo de elasticidade começa a diminuir, embora ainda permaneça superior ao da madeira não tratada. Essas variações são refletidas no coeficiente de variação, que também aumenta à medida que a temperatura de tratamento aumenta. A variabilidade dos valores de MOE, expressa pelo coeficiente de variação (CV), foi alta para todos os tratamentos, com exceção da temperatura de 160°C, que apresentou CV de 18,1%. Isso sugere que, dos tratamentos estudados, o tratamento a 160°C teve os valores de MOE mais próximos da média, indicando maior homogeneidade nas propriedades mecânicas da madeira.

Quanto ao módulo de ruptura, a madeira "in natura" apresenta valor médio de 106 MPa. À medida que a temperatura de tratamento térmico aumenta, o módulo de ruptura tende a aumentar, atingindo 136 MPa, a 160°C. No entanto, a partir de 180°C, observa-se redução acentuada no módulo de ruptura, chegando a aproximadamente 77 MPa, a 200°C. Isso representa diminuição significativa em relação à madeira não tratada. O coeficiente de variação também aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura do tratamento térmico, indicando maior variabilidade nos resultados.

Esses resultados sugerem que o tratamento térmico inicialmente promove um aumento nas propriedades mecânicas da madeira, especialmente no módulo de elasticidade, tornando-a mais rígida. No entanto, à medida que a temperatura continua a aumentar, ocorre uma degradação das propriedades mecânicas, o que pode tornar a madeira mais quebradiça e menos resistente à flexão. Essas conclusões estão alinhadas com estudos anteriores, como mencionado por Poncsák et al. (2006), que discutem a degradação dos componentes da madeira em altas temperaturas e suas consequências nas propriedades mecânicas.

Tabela 8. Valores máximos, médios, mínimos e coeficiente de variação dos módulos de elasticidade e de ruptura da madeira de *Pinus elliotti*, tratadas termicamente e da madeira “in natura” (sem tratamento térmico)

Tratamentos (°C)	Máximo	Médio	Mínimo	Coeficiente de Variação (%)
	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>			
“in natura”	21818	13524	7219	27,8
160	22816	18070	11039	18,1
180	24102	14922	7019	34,4
200	22696	14083	6746	33,4
<b>Módulo de Ruptura (MPa)</b>				
“in natura”	165	106	54	23,6
160	179	136	50	24,7
180	178	106	46	36,7
200	148	77	36	40,3

Fonte: Dados do autor (2021)

A influência da modificação térmica no módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) da madeira de *Pinus elliotti* está apresentada na Tabela 9. O teste de Kruskal-Wallis revelou diferenças significativas entre os grupos ( $X^2(3) = 16,43$ ;  $p < 0,0009$ ). O teste de post-hoc de Dunn revelou que os valores de mediana e amplitude interquartil do MOE, no tratamento a 160°C que foram de, respectivamente, 19093 e 5440 MPa, foram diferentes dos valores da madeira “in natura”, que foram de 11937 e de 5776 MPa e dos valores da madeira tratada a 200°C, que foram de 14339 e de 7561 MPa. Quanto ao MOR, a ANOVA de uma via mostrou efeito significativo da temperatura sobre a média ( $F(3,116) = 3.841$ ;  $p = 2,01 \times 10^{-08}$ ). O teste de post-hoc Tukey HSD revelou diferenças entre todos os grupos, exceto entre a madeira não tratada termicamente (“in natura”) e aquela que foi tratada a temperatura de 180 °C. Seus valores foram, respectivamente de 11303 MPa e de 11021 MPa, indicando semelhança entre esses tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9. Comparação múltipla das medianas dos valores do módulo de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR), da madeira de *Pinus Elliotti*, “in natura (não tratadas) e tratadas termicamente, pelo teste de Kruskal-Wallis, a 5% de significância

Tratamento	Módulo de Elasticidade (MPa)				Percentual de variação
	Médias		Medianas		
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Amplitude Interquartil	
“In Natura” (Não tratada)	13224	4086	11937 b	5776	---
160°C	17736	3848	19093 a	5440	34,1
180°C	14922	5137	14698 a b	9531	12,7
200°C	14083	4708	14339 b	7561	6,5
Kruskal-Wallis	H = 16.43***; p < 0.0009				
	Módulo de Ruptura (MPa)				Percentual de variação
	Médias		Medianas		
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Amplitude Interquartil	
“In Natura” (Não tratada)	109 b	29,3	101	30,2	---
160°C	136 a	33,5	146	50,9	24,7
180°C	106 b	39,1	109	64,9	- 2,5
200°C	77 c	31,1	71	40,5	- 29,0
Anova	F = 3.841***; p = 2.01x10 <sup>-08</sup>				

Nota: Valores com letras diferentes entre as linhas de um mesmo tratamento térmico indicam diferenças significativas, a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024)

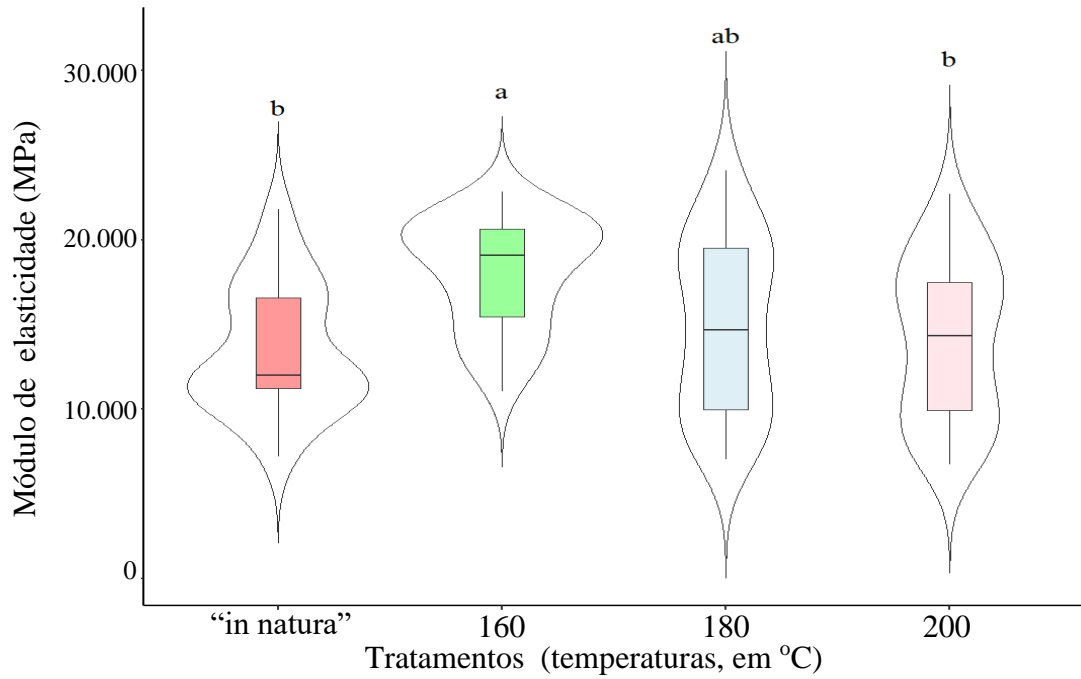
A observação dos resultados revela que o tratamento térmico a 160°C teve um impacto significativo no MOE, resultando no aumento notável de aproximadamente 34,1% em comparação com a madeira "in natura" não tratada termicamente, como evidenciado na Figura 11. Aumentos similares foram observados nas temperaturas de 180°C e 200°C, com aumentos percentuais de 12,7% e 6,5%, respectivamente, em relação à madeira "in natura" (não tratada termicamente). No entanto, é importante observar que, para esses tratamentos, os valores do MOE não apresentaram diferenças significativas quando comparados com a madeira "in natura" (não tratada termicamente).

Essa melhora substancial no MOE pode ser atribuída a diversos fatores. Primeiramente, a alta temperatura do tratamento térmico resulta em uma maior cristalinidade da celulose e uma redução na umidade da madeira. Ambos esses fatores contribuem para o aumento da resistência à flexão, tornando a madeira mais rígida. Além disso, a elevada temperatura promove a reticulação da lignina, o que aumenta a rigidez em torno das microfibrilas de celulose e fortalece a estrutura da lamela média (GUNDUZ; AYDEMIR; KARAKAS, 2009)

Esses resultados corroboram com estudos anteriores (FU et al., 2020; MANIA et al., 2020), indicando que o tratamento térmico é capaz de melhorar as propriedades mecânicas da madeira, tornando-a um material mais resistente e rígido. Portanto, a utilização do tratamento térmico pode ser uma estratégia promissora para aprimorar a qualidade e as características da madeira de *Pinus elliottii*, tornando-a mais adequada para diversas aplicações na indústria da madeira.

Para o Módulo de Ruptura (MOR), os resultados indicaram aumento significativo de aproximadamente 25% nos valores quando a madeira foi submetida a 160°C, em comparação com a madeira "in natura" (FIGURA 12). Contudo, este aumento ocorre principalmente no início do tratamento, sendo seguido posteriormente pela degradação térmica, que resulta na redução dos valores do MOR, corroborando com Menezes et al. (2019). Mesmo comportamento é evidenciado no tratamento térmico a 200°C, observa-se redução significativa da rigidez, de aproximadamente 29%, quando comparada com a madeira "in natura". Este fato pode ser explicado pela drástica perda das hemiceluloses, ocorrida em temperaturas próximas a 200°C, conforme relataram Boonstra et al. (2007). Portanto, os resultados sugerem que o tratamento térmico a 200°C afeta de maneira notável a rigidez da madeira, o que deve ser considerado ao selecionar as condições ideais de tratamento para aplicações específicas na indústria da madeira.

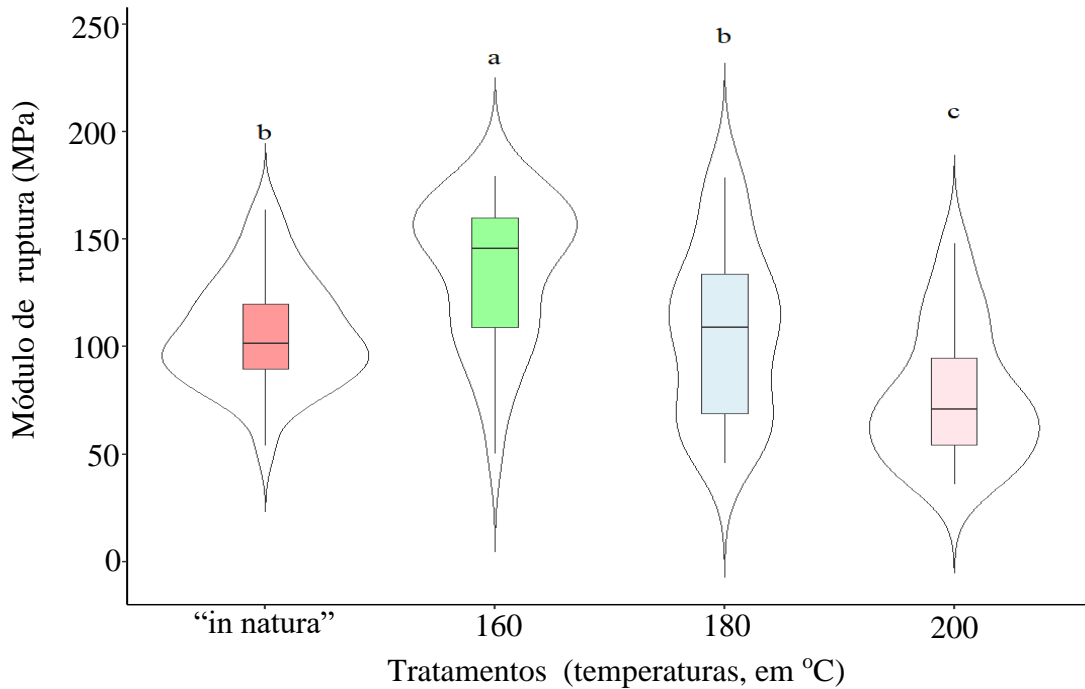
Figura 10. Box-plot do comportamento do módulo de elasticidade (MOE) da madeira de *Pinus elliotti* nos diferentes tratamentos térmicos.



Nota: Valores com letras diferentes indicam diferenças significativas a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024).

Figura 11. Box-plot do comportamento do módulo de ruptura da madeira de *Pinus elliotti* nos diferentes tratamentos térmicos.



Nota: Valores com letras diferentes indicam diferenças significativas a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024).



Esses resultados destacam a influência significativa da temperatura de tratamento térmico na rigidez e resistência da madeira de *P. elliotti*, com o tratamento a 160°C promovendo aumento nessas propriedades, enquanto temperaturas mais elevadas, como 200°C, resultam em redução significativa. Portanto, a escolha da temperatura de tratamento térmico desempenha papel crucial na determinação das propriedades mecânicas da madeira.

Os valores médios do MOE e do MOR observados neste estudo estão em consonância com os resultados obtidos por Menezes et al. (2019) e Nhacila et al. (2020), demonstrando consistência e validade dos resultados. Adicionalmente, o aumento dos valores do MOE para a madeira tratada a 160°C está próximo dos valores encontrados por Araújo et al. (2016), reforçando a concordância com estudos prévios.

Nos ensaios de flexão estática, foi possível observar que a madeira de *P. elliotti* modificada termicamente a 200°C apresentou rupturas abruptas. Este fato demonstrou que esta madeira foi mais frágil em relação à madeira “in natura” (não tratada), que manifestou comportamento mais elástico. Nesse contexto, fica evidente, com base nos valores obtidos, que até 200°C, o MOE não sofreu decréscimo suficiente para afetar as características elásticas da madeira. No entanto, no que se refere ao MOR, a partir de 180°C, a madeira já começou a sofrer redução, que se acentuou até 200°C. Estas reduções foram provavelmente devido ao aumento da degradação dos constituintes da madeira, conforme pode ser observado nos valores de perda de massa.

Esses resultados sugerem que o tratamento térmico a 200°C afetou significativamente a resistência à ruptura da madeira, tornando-a mais frágil. Portanto, a escolha da temperatura de tratamento térmico deve levar em consideração as propriedades mecânicas desejadas, uma vez que temperaturas mais elevadas podem comprometer a resistência da madeira em aplicações estruturais.

#### **4.4. Parâmetros colorimétricos**

A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros colorimétricos ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$ ) e seus coeficientes de variação (%) para os corpos de prova não tratados e tratados termicamente. Observa-se que o menor valor de luminosidade ( $L^*$ ) foi de 29,0, ocorrendo no tratamento térmico a 200°C, enquanto o maior valor foi de 66,32, referente à madeira não tratada termicamente. A dispersão dos dados para  $L^*$  foi baixa, mantendo-se abaixo de 10% para todos os tratamentos.

No que se refere ao matiz vermelho ( $a^*$ ), o menor valor encontrado foi de 5,9, e o maior foi de 12,3, ambos para a temperatura de 200°C. De maneira geral, a maior dispersão dos dados foi observada para a temperatura de 180°C, com um coeficiente de variação de 22,3%. Os demais tratamentos apresentaram coeficientes de variação inferiores a 10%, indicando homogeneidade satisfatória dos dados entre os tratamentos térmicos.

Para o matiz amarelo ( $b^*$ ), o menor valor foi de 14,3, verificado no tratamento a 200°C, enquanto o maior valor foi de 24,1, correspondente à madeira tratada a 160°C. A dispersão dos dados para  $b^*$  também permaneceu abaixo de 10% para todos os tratamentos, exceto para o tratamento a 200°C, que apresentou um coeficiente de variação de 8,1%.

No que se refere à saturação da cor ( $C^*$ ), o menor valor foi de 17,6, obtido nas madeiras tratadas a 200°C, enquanto o maior valor foi de 26,09, observado no tratamento a 160°C. A variação dos dados de  $C^*$  foi inferior a 8% para todos os tratamentos, com o maior coeficiente de variação encontrado sendo de 7,7% para o tratamento a 160°C.

O ângulo de matiz ( $^*h$ ), que expressa a tonalidade da cor, variou entre os tratamentos. O maior valor foi observado na madeira não tratada termicamente, enquanto o menor valor foi encontrado na madeira tratada a 200°C. A variabilidade dos dados para  $^*h$  foi considerada baixa, com todos os coeficientes de variação inferiores a 3%, sendo o maior valor de 2,5% para a madeira tratada a 200°C e o menor valor de 1,6% para a madeira tratada a 160°C.

O tratamento térmico influenciou significativamente nos parâmetros colorimétricos da madeira de *Pinus elliotti*. Todos os corpos de provas tratados termicamente resultaram em diminuição significativa da luminosidade ( $L$ ), em comparação com a madeira “in natura” (não tratada termicamente), indicando escurecimento da cor da madeira após o tratamento. A temperatura de 160°C teve o maior impacto no parâmetro  $L$ , conforme evidenciado pelo maior valor de  $F$  na ANOVA.

Tabela 10. Valores máximos, médios, mínimos e coeficiente de variação dos dados de parâmetros colorimétricos ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$ ) de *Pinus elliotti*, com ou sem tratamento térmico

Tratamento (°C)	Máximo Médio Mínimo Coeficiente de Variação (%)			
	Luminosidade ( $L^*$ )			
“in natura” (Não tratada)	66,3	61,4	54,5	4,5
160	62,0	58,3	52,0	4,3
180	53,4	49,8	44,7	4,8
200	41,5	35,4	29,0	8,6
Matiz vermelho ( $a^*$ )				
“in natura” (Não tratada)	8,6	7,3	5,9	9,6
160	9,9	8,1	6,8	10,0
180	12,2	10,6	9,1	22,3
200	12,3	11,0	10,1	5,5
Matiz amarelo ( $b^*$ )				
“in natura” (Não tratada)	21,6	20,2	19,1	3,6
160	24,1	21,1	17,7	7,6
180	23,3	21,7	19,5	5,6
200	19,3	16,7	14,3	8,1
Saturação da cor ( $C^*$ )				
“in natura” (Não tratada)	22,9	21,5	20,4	3,8
160	26,1	22,6	19,1	7,7
180	26,00	24,2	21,9	4,8
200	22,6	20,0	17,6	6,8
Ângulo de tinta ( $h^*$ )				
“in natura” (Não tratada)	1,3	1,2	1,2	2,3
160	1,3	1,2	1,2	1,6
180	1,2	1,1	1,1	2,1
200	1,0	1,0	0,9	2,5

Fonte: Do autor (2021)

Na Tabela 11, podemos observar o efeito da temperatura da modificação térmica nos parâmetros colorimétricos da madeira de *Pinus elliotti*. A mudança mais intensa de cor foi encontrada na luminosidade ( $L$ ). Todas as madeiras tratadas termicamente apresentaram diminuições significativas (ANOVA,  $p = 2 \times 10^{-16}$ ) quando comparadas à madeira não tratada termicamente. Esse fenômeno se traduz na madeira tratada tornando-se mais escura, o que está de acordo com os valores encontrados por Amorim, Gonzalez e Camargos (2013). Nota-se que o parâmetro colorimétrico mais sensível ao tratamento térmico, dentro da faixa de temperaturas

estudadas, foi a luminosidade ( $L$ ), que apresentou o maior valor de  $F$ , conforme observado na Tabela 11.

Tabela 11. Comparação múltipla das médias e medianas dos valores dos parâmetros colorimétricos, de *Pinus Elliotti*, não tratadas e tratadas termicamente, pelo teste de Kruskal-Wallis, a 5% de significância.

Tratamento	L*		a*		b*	
	Média (Desvio-padrão)	Percentual de variação	Média (Desvio-padrão)	Percentual de variação	Mediana (Amplitude Interquartil)	Percentual de variação
Não tratada → Testemunha	61,4 (2,8) a	-	7,5 (1,0) b	-	20,0 (0,9) b	-
160°C	58,3 (2,5) b	- 5,1	8,0 (0,9) b	7,3	21,5 (1,9) a	5,6
180°C	49,8 (2,4) c	- 18,9	10,5 (0,8) a	39,7	21,8 (1,4) a	8,6
200°C	35,4 (3,1) d	- 42,4	11,0 (0,7) a	46,3	16,6 (1,6) c	- 19,3
	F= 563,7 ***		F=121,2***		H= 78,5 ***	

Nota: L\*= Luminosidade; a\*= Matiz Vermelho; b\*= Matiz Amarelo. Valores com letras diferentes entre as linhas de um mesmo tratamento térmico indicam diferenças significativas ao nível de 5% de significância; H= Kruskal-Wallis; F= Anova; (\*) significativos a  $p < 0,05$ ;

Fonte: Dados do autor (2024)

As hemiceluloses e a celulose refletem a luz visível com altos números de onda, resultando em percepção de cor clara. No entanto, a degradação desses componentes durante o tratamento térmico leva ao escurecimento da madeira (MOURA; BRITO; BORTOLETTO JÚNIOR, 2012). Os valores de luminosidade ( $L$ ) variaram de 61,4 para 35,4. Nas madeiras tratadas a 200°C, a redução da luminosidade observada foi de até 42% (Figura 13), em comparação com as madeira “in natura” (não tratadas termicamente). Esses resultados são consistentes com os encontrados por Pincelli, Moura e Brito (2012) e Zanuncio et al. (2015) em outras madeiras do gênero *Pinus* submetidas a tratamento térmico.

O tratamento térmico também resultou em aumento significativo (ANOVA,  $p = 2 \times 10^{-16}$ ) no matiz vermelho ( $a$ ), para as temperaturas de 180°C e 200°C, com ganhos de 40% e 46%, respectivamente, em relação à madeira “in natura” (não tratadas termicamente). Esses dados estão em consonância com Herrera-Builes et al. (2021), Pincelli, Moura e Brito (2012), Moura e Brito (2011) e Zanuncio et al. (2015), que relataram aumento na pigmentação vermelha em madeiras do gênero *Pinus* submetidas a tratamento térmico. Essa pigmentação vermelha está fortemente associada ao conteúdo de extrativos da madeira, como observado por Salca et al. (2016).

O índice do eixo amarelo-azul ( $b$ ) apresentou aumento significativo de 6% e 9% para as temperaturas de 160°C e 180°C, respectivamente, resultando em aumento na pigmentação amarela (Figura 13). No entanto, foi observada redução significativa de 19%, a 200°C em relação à madeira não tratada termicamente. A pigmentação amarela presente na madeira não tratada é influenciada principalmente pela fotoquímica da lignina e extrativos que apresentam cromóforos (ZHANG et al., 2018). O aumento da temperatura a 200°C pode ter interferido na estrutura e quantidade desses compostos na madeira (MOURA; BRITO, 2011). A alteração na cor pode estar associada à formação de produtos cromógenos devido à degradação térmica de alguns componentes presentes na parede celular, que estão principalmente relacionados à lignina.

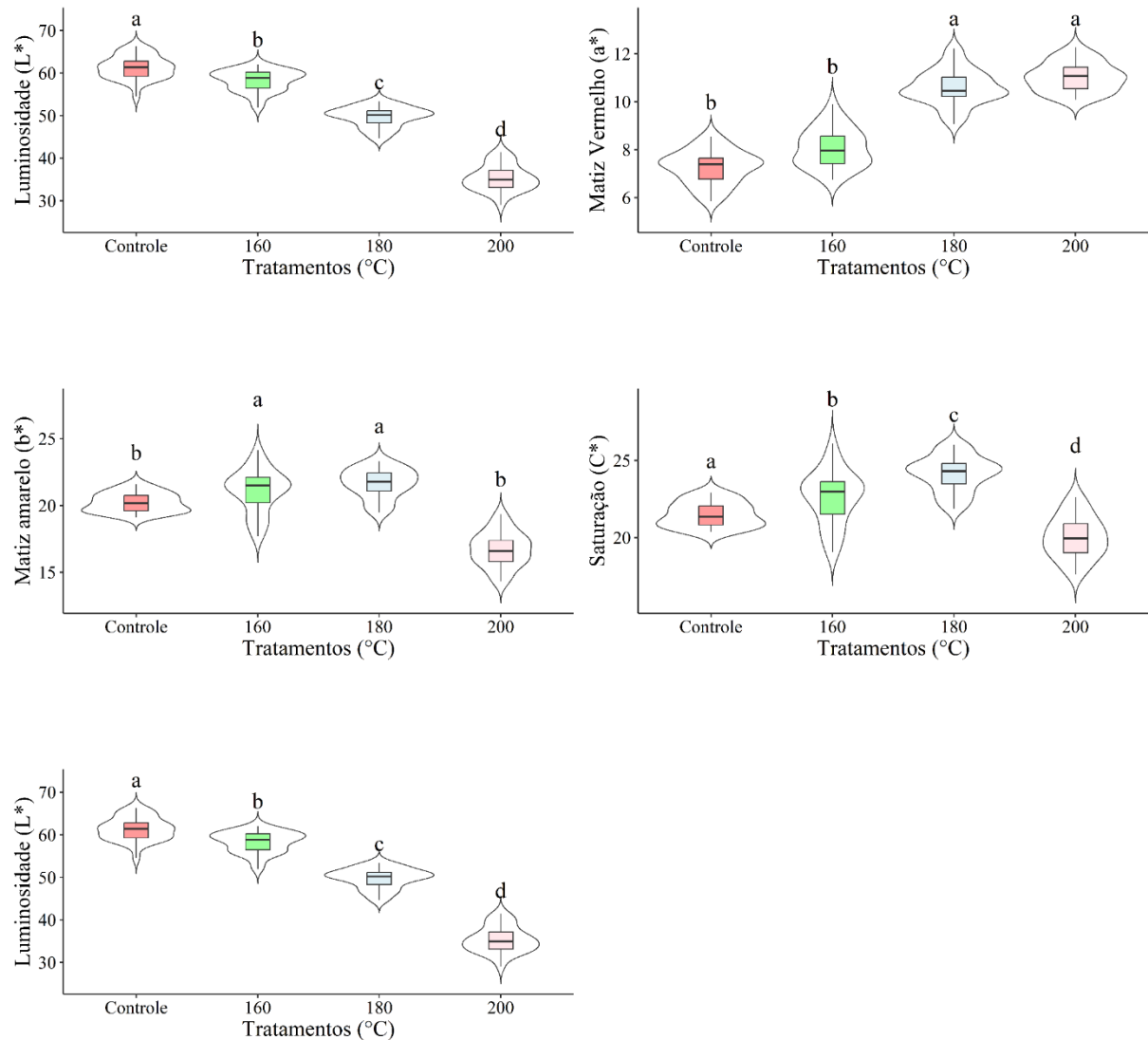
A análise das mudanças na tonalidade (ângulo  $h^*$ ) em resposta ao tratamento térmico evidenciou diminuição significativa com o aumento da temperatura para todas as temperaturas investigadas (Figura 13). Essa redução na tonalidade indica transformação na cor da madeira, resultando na coloração marrom mais pronunciada. Essa observação está em consonância com estudos de Andrade (2021), Brito et al. (2018) e Shukla (2019), os quais relataram alteração na tonalidade da madeira, para tonalidades mais escuras, especialmente quando submetida a tratamentos térmicos de alta temperatura. O menor ângulo  $h^*$  indica que a cor original da madeira se tornou mais distinta em relação à tonalidade marrom. Estes resultados sugerem que a

tonalidade da madeira de *Pinus elliottii* é sensível ao tratamento térmico, o que tem implicações significativas na sua aparência e potencial uso final em aplicações que demandam características estéticas específicas

Os dados referentes à saturação ( $C^*$ ) revelaram padrão interessante em resposta ao tratamento térmico. Observou-se aumento discreto da saturação ( $C^*$ ) até a temperatura de 180°C, quando os valores se afastaram dos registros da madeira "in natura". No entanto, a temperatura de 200°C trouxe diminuição nos valores de saturação, resultando no deslocamento da cor em direção ao espectro de cores mais amareladas.

Além disso, a variação da cor ( $\Delta E$ ) demonstrou mudanças significativas conforme a intensidade do tratamento térmico. É notável que a madeira tenha escurecido visivelmente nas temperaturas de 180°C ( $\Delta E = 3,6$ ) e 200°C ( $\Delta E = 5,3$ ), o que é perceptível a olho nu. Essa observação está de acordo literatura pertinente, que consideraram mudanças de cor visíveis quando o valor de  $\Delta E$  ultrapassa 3%.

Figura 12. Efeito das temperaturas sobre os parâmetros colorimétricos da madeira de *Pinus elliotti*.



Nota: Valores com letras diferentes indicam diferenças significativas a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2024)

#### 4.5. Análise de componentes principais e correlação de Pearson

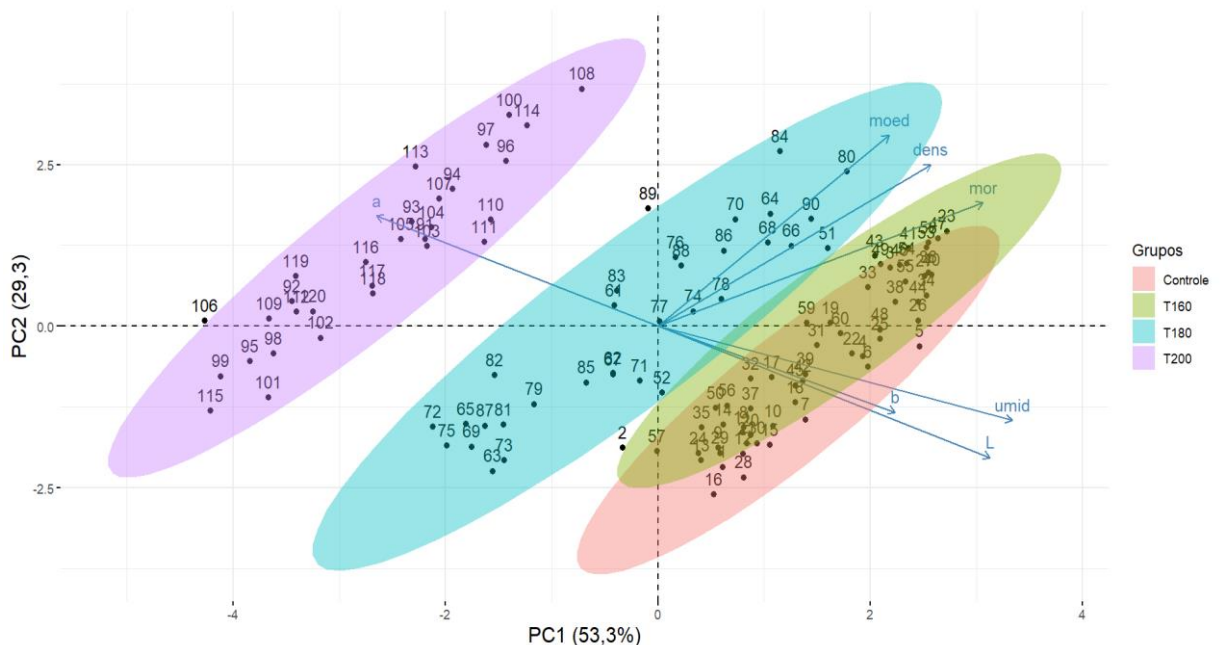
Na análise de componentes principais (PCA), as dimensões obtidas revelam a estrutura subjacente nos dados multivariados, proporcionando melhor compreensão das relações entre as variáveis analisadas. O componente principal 1 (CP1) destacou-se ao capturar



aproximadamente 53,28% da variância total, indicando que essa dimensão é preponderante na explicação das variações observadas nos dados (Figura 14).

O componente principal 2 (PC2), por sua vez, contribuiu significativamente para a explicação adicional da variância, adicionando 29,35% à compreensão global dos padrões presentes (Figura 14). Juntas, PC1 e PC2 explicam cumulativamente cerca de 82,63% da variabilidade total, evidenciando sua relevância na caracterização das variações nos dados.

Figura 13. Mapa percentual com resultados dos componentes principais (PCA) para Umidade de equilíbrio = *umid*, Densidade da madeira = *dens*, Módulo de elasticidade = *moed*, Módulo de ruptura = *mor*,  $L^*$  = *Luminosidade*,  $a^*$  = coordenada cromática do eixo verde-vermelho,  $b^*$  = coordenada cromática do eixo azul-amarelo  $C^*$  = cromia ou saturação e  $h$  = ângulo de matiz.



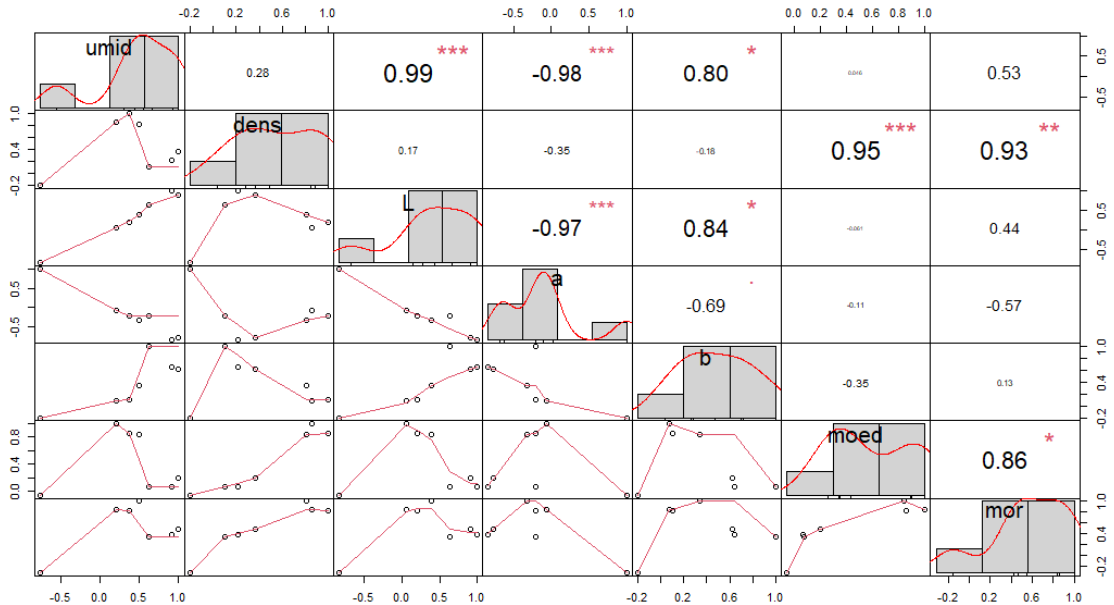
Fonte: Do autor (2024)

A análise da matriz de correlação revela interdependências significativas entre as variáveis estudadas. Inicialmente, destaca-se a forte correlação positiva entre umidade de equilíbrio e luminosidade -  $L^*$  (Figura 15), indicando que os corpos de prova mais úmidos tenderam a apresentar maior luminosidade. Essa relação era esperada, considerando que a água pode influenciar diretamente nas características ópticas da madeira, afetando a sua luminosidade, conforme relatado por Barr et al. (2019).

A correlação negativa expressiva entre a coordenada cromática  $a^*$  e umidade da madeira em equilíbrio é outro aspecto notável. Isso sugere que corpos de provas mais úmidos tendem a

ter matizes mais avermelhados. Em contrapartida, a correlação positiva moderada entre a coordenada cromática  $b^*$  e umidade da madeira em equilíbrio é interessante, indicando que corpos de prova mais úmidos podem apresentar matizes mais amarelados (Figura 15).

Figura 14. Matriz de Correlação entre as Variáveis de Interesse. conforme segue: para  $L^*$  = Luminosidade,  $a^*$ = coordenada cromática do eixo verde-vermelho e  $b^*$ = coordenada cromática do eixo azul-amarelo.



Os números representam os coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis. Valores mais próximos de 1 indicam correlação positiva mais forte, enquanto valores mais próximos de -1 indicam correlação negativa mais forte. O tamanho das letras e os histogramas diagonais auxiliam na interpretação visual das relações entre as variáveis.

Fonte: Do autor (2024)

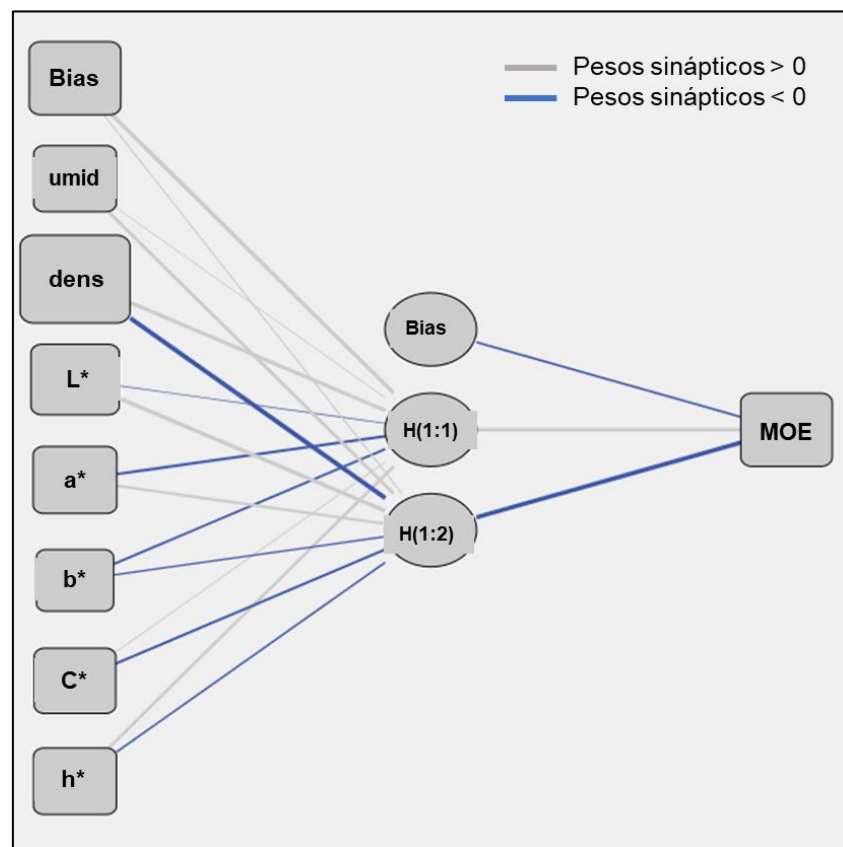
No contexto das propriedades mecânicas, a correlações positivas entre o módulo de elasticidade (MOE) e a densidade aparente da madeira destacou a influência direta na rigidez do material. Da mesma forma, a correlação positiva entre o módulo de ruptura (MOR) e a densidade aparente reforça a importância da densidade na resistência à ruptura da madeira.

Em relação às correlações entre as propriedades mecânicas e a umidade, destaca-se a correlação positiva moderada entre o módulo de elasticidade (MOE) e a umidade da madeira em equilíbrio. A correlação entre a umidade e o módulo de ruptura (MOR) foi menos pronunciada.

#### 4.6. Predição dos módulos de elasticidade e de ruptura por RNA's

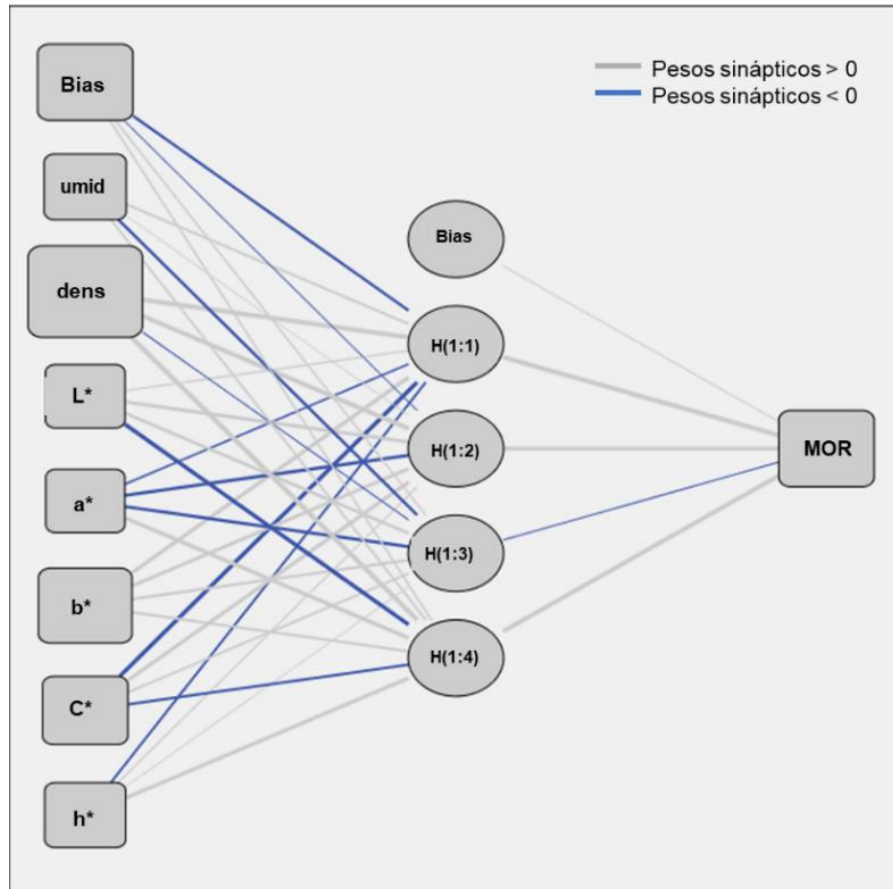
As arquiteturas das RNA desenvolvidas neste estudo estão apresentadas nas Figuras 16 e 17, juntamente com suas respectivas camadas de entrada, camadas ocultas, neurônios, camadas de saída e pesos sinápticos. As redes neurais artificiais foram utilizadas para prever a resistência (Figura 16) e a rigidez (Figura 17) à flexão estática da madeira de *P. elliotti* em função da temperatura. Ambas as RNAs foram construídas com 7 neurônios de entrada e 1 camada oculta, contendo 2 neurônios para a predição do MOE e 4 neurônios para o MOR.

Figura 16. Arquitetura da RNA para a predição do MOE.



Fonte: Do autor (2024)

Figura 17. Arquitetura da RNA para a predição do MOR.



Fonte: Do autor (2024)

Os dois modelos de RNA foram desenvolvidos com base nos valores da umidade da madeira em equilíbrio, densidade da madeira e parâmetros colorimétricos obtidos durante o tratamento térmico, em relação às propriedades mecânicas. Na predição do Módulo de Elasticidade (MOE) (Figura 16), foram observadas conexões mais robustas, representadas por pesos sinápticos altamente negativos, nas entradas que incluíam densidade aparente,  $a^*$  (matiz verde-vermelho),  $b^*$  (matiz azul-amarelo),  $C^*$  (saturação de cor) e  $h^*$  (ângulo de tonalidade). Por outro lado, as conexões com pesos sinápticos significativamente positivos foram associadas à entrada de umidade da madeira em equilíbrio, densidade aparente, luminosidade ( $L^*$ ),  $a^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$  (Tabela 12). Para a predição do Módulo de Ruptura (MOR) (Figura 17), os pesos sinápticos mais negativos nas entradas foram identificados em  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$ , enquanto os pesos altamente positivos foram associados à umidade da madeira em equilíbrio, densidade aparente,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$  (Tabela 12). Conexões mais robustas, independentemente de serem positivas ou negativas, indicam que a variável de entrada desempenha um papel crucial na definição da

variável de saída, visto que a qualidade dos dados afeta o desempenho da Rede Neural Artificial (RNA) (RAMALHO et al., 2020).

Tabela 5. Pesos sinápticos associados às entradas para a predição do MOE e do MOR

Preditor	MOE Predito			MOR Predito				
	Camada Oculta 1		Camada de saída	Camada Oculta 1			Camada de Saída	
	H(1:1)	H(1:2)	MOE	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	MOR
<b>(Bias)</b>	0,662	0,154		-0,252	-0,028	0,117	0,122	
<b>umidade</b>	0,002	0,415		0,146	0,001	-0,276	0,135	
<b>densidade</b>	0,521	-1,192		0,609	0,599	-0,047	0,656	
Camada de entrada	<b>L</b>	0,000	0,628	0,089	0,308	0,282	-0,452	
	<b>a</b>	-0,210	0,306	-0,128	-0,290	-0,285	0,421	
	<b>b</b>	-0,207	-0,171	0,407	0,296	0,203	0,179	
	<b>C</b>	0,150	-0,208	-0,469	0,323	0,144	-0,184	
	<b>h</b>	0,376	-0,177	-0,176	0,081	0,019	0,401	
Camada Oculta 1	<b>(Bias)</b>							-0,0191
	<b>H(1:1)</b>							0,514
	<b>H(1:2)</b>							-1,090
	<b>H(1:3)</b>							-
	<b>H(1:4)</b>							-
								0,035
								0,617
								0,576
								-0,079
								0,589

Fonte: Dados do autor (2024)

#### 4.6.1. Desempenho das redes neurais artificiais treinadas

Os principais critérios para avaliar o desempenho do modelo de RNA na predição do MOE e do MOR, incluindo o MAPE, RMSE e  $R^2$ , são apresentados na Tabela 13.

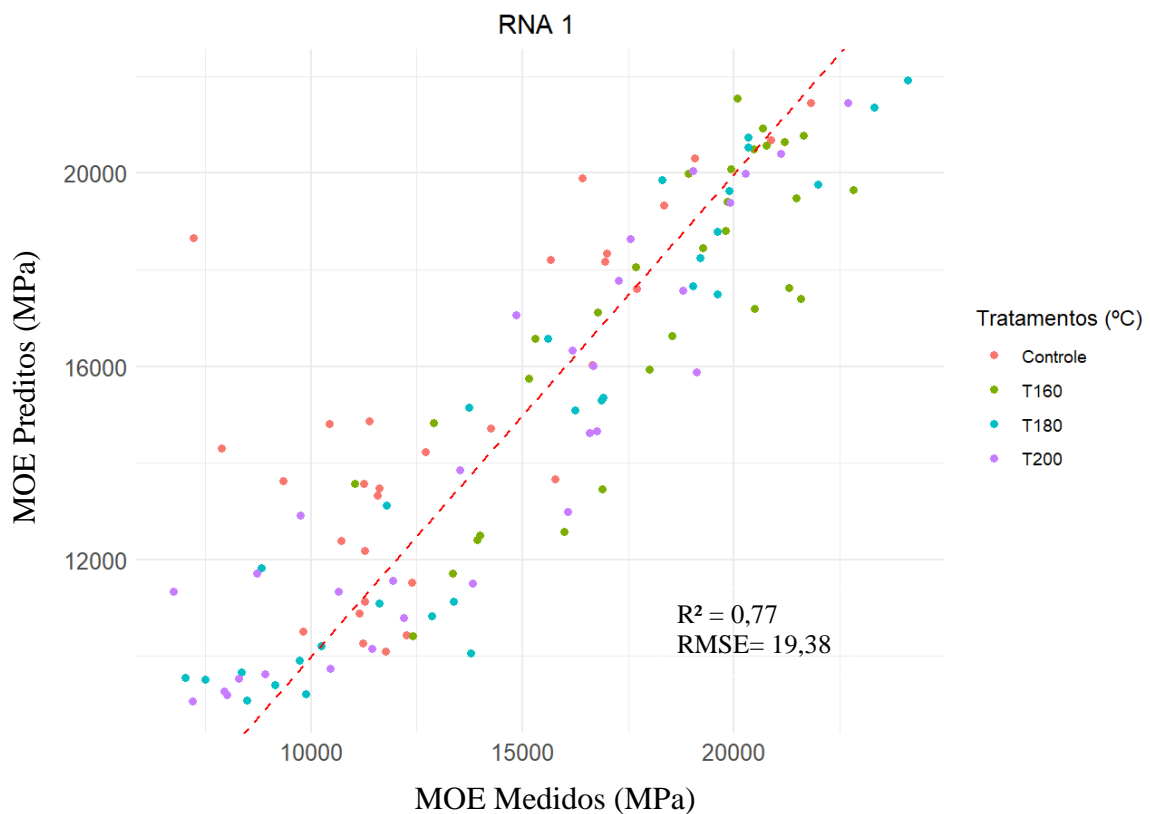
Tabela 63. Desempenho estatístico do modelo de Neurais Artificiais usado para predição do MOE e do MOR da madeira de *Pinus elliotti* tratada termicamente.

	Critérios de desempenho		
	MAPE (%)	RMSE(MPa)	$R^2$
MOE (RNA1)	13,07	2185,4	0,77
MOR (RNA2)	14,41	16,85	0,805

Fonte: Dados do autor (2024).

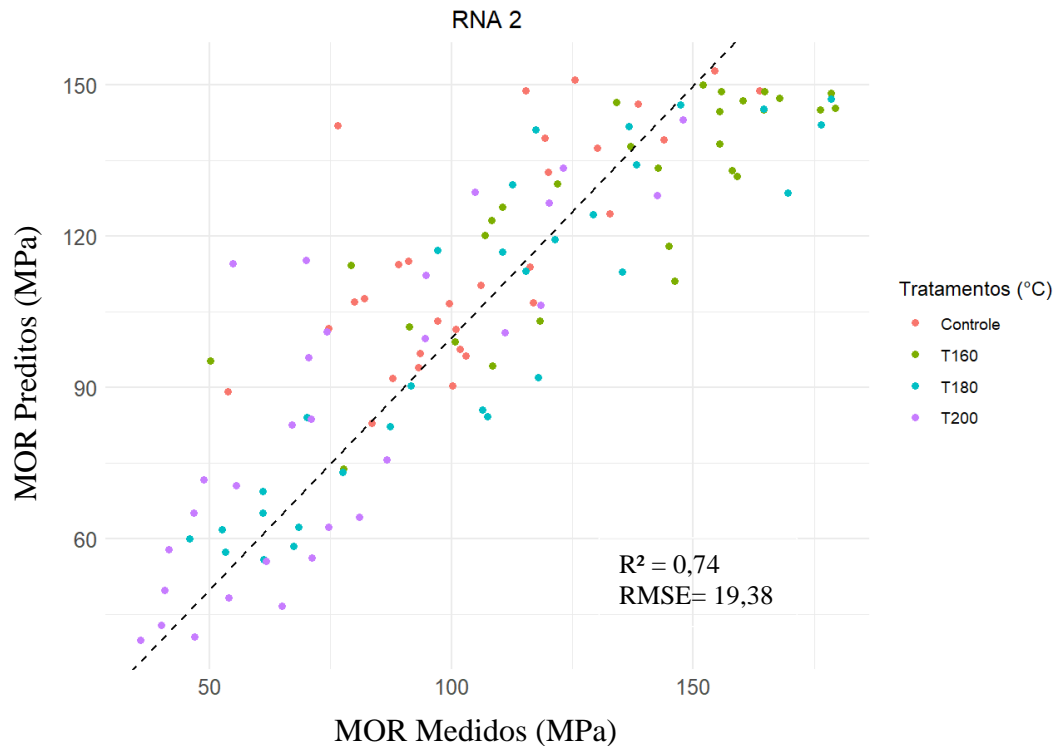
O MAPE, que é um critério crucial para avaliar o desempenho dos modelos, foi de 13,07% para o MOE e 16,61% para o MOR. Esses níveis de erro podem ser considerados satisfatórios para a predição dos parâmetros estudados, visto que se aproximam de 0. De acordo com Haghbakhsh et al. (2013), isso indica que a RNA apresentou excelente desempenho. Observa-se na Tabela 13 que os modelos de RNA propostos foram capazes de prever o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura da madeira com alta precisão quando comparados aos valores reais (Figura 18 e 19). De acordo com Aydin; Karakurt; Hamzacebi (2014), Nguyen et al. (2019) e Sofuoglu (2015), valores de MAPE inferiores a 20% são considerados indicativos de boa previsão.

Figura 18. Relação entre os valores reais e previstos do MOE da madeira tratada termicamente.



Fonte: Do autor (2024)

Figura 19. Relação entre os valores reais e previstos do MOR da madeira tratada termicamente.



Fonte: Do autor (2024)

Os valores de RMSE foram de 2185 MPa para o MOE e de 19,4 MPa para o MOR. Isso indica que a rede neural obteve excelente desempenho na predição do MOR. Tanto os valores de MAPE quanto de RMSE foram considerados satisfatórios, especialmente considerando a heterogeneidade natural da madeira, o que está de acordo com as conclusões de Sofuoglu (2015).

O valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido, que corresponde a 0,77, indica que aproximadamente 77% da variabilidade na variável de saída (MOE) podem ser explicadas pelas variáveis de entrada incluídas no modelo de RNA1. Para o modelo de RNA do MOR, o valor de  $R^2$  foi de 0,74, indicando que o modelo foi capaz de explicar 74% dos valores observados. Esses resultados são notáveis, superando os encontrados em outros estudos (Esteban; Fernández; Palacios, 2009; Fernández et al., 2012). Isso demonstra a eficácia dos modelos de RNA desenvolvidos para a predição do MOE e MOR da madeira de *Pinus elliotti* tratada termicamente.

A distribuição dos pesos sinápticos nas entradas da RNA desempenha um papel crucial na compreensão de como as variáveis de entrada afetam as propriedades mecânicas da madeira. Como mencionado, conexões positivas ou negativas indicam a importância relativa dessas variáveis na previsão do Módulo de Elasticidade (MOE) e do Módulo de Ruptura (MOR). Por

exemplo, a presença de conexões positivas e robustas nas entradas de umidade da madeira em equilíbrio, densidade aparente, luminosidade ( $L^*$ ), matiz vermelho-verde ( $a^*$ ), saturação de cor ( $C^*$ ) e ângulo de tonalidade ( $h^*$ ) para a predição do MOE sugere que esses parâmetros colorimétricos e de densidade têm um impacto significativo na rigidez da madeira. Isso pode estar relacionado à forma como as mudanças na composição química da madeira afetam sua capacidade de resistir à deformação quando submetida a cargas.

Além disso, a presença de conexões negativas nas entradas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $C^*$  e  $h^*$  para a predição do MOR indica que esses parâmetros estão inversamente relacionados com a resistência à ruptura da madeira. Essa relação pode estar ligada à degradação térmica desses componentes, que pode enfraquecer as ligações intermoleculares na madeira, tornando-a mais suscetível à ruptura.

Em relação às limitações, é fundamental avaliar a sensibilidade dos modelos de RNA a variações extremas nos dados. Por exemplo, a presença de valores discrepantes ou pontos extremos nas variáveis de entrada poderia exercer impactos significativos nas previsões da RNA. Adicionalmente, é pertinente investigar se existem variáveis não contempladas que possam aprimorar ainda mais a precisão das estimativas. A consideração de fatores como a taxa de aquecimento do tratamento térmico poderia influenciar as propriedades mecânicas de forma relevante.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a modificação térmica foi capaz de promover alterações substanciais nas propriedades da madeira de *Pinus elliotti*, fornecendo informações valiosas para a compreensão e utilização dessa matéria-prima em diversas aplicações.

No que diz respeito às propriedades mecânicas, observou-se aumento significativo no módulo de elasticidade (MOE), em temperaturas de tratamento de 160°C e 180°C. Isso é atribuído ao aumento da cristalinidade da celulose e à redução da umidade durante o tratamento térmico, que contribuíram para o aumento da resistência à flexão. Entretanto, em temperaturas mais elevadas, como 200°C, houve redução significativa no MOE devido à degradação térmica dos componentes da madeira.

O módulo de ruptura (MOR), por sua vez, apresentou aumento inicial acentuado nas temperaturas de 160°C e 180°C, mas com redução significativa em 200°C. Isso pode ser explicado pela combinação do aumento da cristalinidade da celulose e degradação de componentes da madeira. Esses resultados são fundamentais para a compreensão das



propriedades mecânicas da madeira tratada termicamente, que pode ser utilizada em diversas aplicações, incluindo construção civil e mobiliário.

Para as características colorimétricas, observou-se escurecimento significativo da madeira tratada termicamente, evidenciado pela luminosidade ( $L^*$ ). Além disso, as mudanças no matiz vermelho ( $a^*$ ) e matiz amarela ( $b^*$ ) também foram influenciadas pelo tratamento térmico, com aumento da pigmentação vermelha e amarela em temperaturas mais elevadas.

A análise de componentes principais (PCA) aplicada às propriedades colorimétricas da madeira de *P. elliotii* revelou informações valiosas sobre a relação entre essas características e os tratamentos térmicos. Os dois primeiros eixos da PCA explicaram 98,98% da variabilidade total.

A análise estatística e o uso de redes neurais artificiais (RNA) para prever as propriedades mecânicas com base em parâmetros colorimétricos e outras variáveis demonstraram a viabilidade para a predição de propriedades da madeira tratada termicamente. Os modelos de RNA apresentaram desempenho satisfatório, com erros de previsão dentro de níveis aceitáveis, destacando sua utilidade na indústria da madeira. No entanto, é importante reconhecer que essas previsões ainda têm limitações e podem ser sensíveis a variações extremas nos dados. Além disso, fatores não considerados, como a taxa de aquecimento durante o tratamento térmico.

No contexto prático, os resultados deste estudo têm implicações significativas. Os dados fornecidos podem orientar a seleção de parâmetros de tratamento térmico para atender a requisitos específicos de propriedades mecânicas e características de cor desejadas em produtos de madeira. Além disso, a utilização de modelos de RNA pode facilitar a otimização de processos de produção e melhorar a qualidade do produto.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 4661–466, 2013.

ANDRADE, F. W. C. **EFICIÊNCIA DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA CLASSIFICAÇÃO E PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES DE MADEIRA MODIFICADA TERMICAMENTE**. Botucatu - SP: Universidade Estadual de São Paulo “Julio Mesquita Filho”, 2021.

ARAÚJO, S. DE O. et al. Physical and mechanical properties of heat treated wood from *aspidosperma populifolium*, *dipteryx odorata* and *mimosa scabrella*. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 18, n. 1, p. 143–156, 2016.

- AUTRAN, C. DA S.; GONÇALEZ, J. C. CARACTERIZAÇÃO COLORIMÉTRICA DAS MADEIRAS DE MUIRAPIRANGA (*Brosimum rubescens*Taub.) E DE SERINGUEIRA (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) VISANDO À UTILIZAÇÃO EM INTERIORES. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 4, p. 445–451, 2006.
- AVRAMIDIS, S.; ILIADIS, L. Wood-water sorption isotherm prediction with artificial neural networks: A preliminary study. **Holzforschung**, v. 59, n. 3, p. 336–341, maio 2005.
- AYDIN, G.; KARAKURT, I.; HAMZACEBI, C. Artificial neural network and regression models for performance prediction of abrasive waterjet in rock cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 9–12, p. 1321–1330, 16 nov. 2014.
- BAAR, J. et al. COLOR CHANGES OF VARIOUS WOOD SPECIES IN RESPONSE TO MOISTURE. **Wood and Fiber Science**, v. 51, n. 2, 2019.
- BÄCHLE, H. et al. Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIR spectroscopy. **Wood Science and Technology**, v. 44, n. 3, p. 421–433, ago. 2010.
- BATISTA, D. C. MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* EM ESCALA INDUSTRIAL PELO PROCESSO BRASILEIRO VAP HolzSysteme®. **Universidade Federal do Paraná**, p. 339, 2012a.
- BATISTA, D. C. **MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* EM ESCALA INDUSTRIAL PELO PROCESSO BRASILEIRO VAP HolzSysteme**. [s.l.: s.n.].
- BATISTA, D. C. et al. Effect of the brazilian process of thermal modification on the physical properties of *Eucalyptus grandis* juvenile wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 20, n. 4, p. 715–724, 1 out. 2018.
- BIZIKS, V. et al. One-stage thermo-hydro treatment (THT) of hardwoods: An analysis of form stability after five soaking-drying cycles. **Holzforschung**, v. 69, n. 5, p. 563–571, 1 jul. 2015.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A.; LENGOWSKI, E. C. Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 28 dez. 2018.
- BOONSTRA, M. J. et al. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, v. 64, n. 7, p. 679–690, out. 2007.
- BORGES, L. M.; QUIRINO, F. W. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173–182, 2004.
- BOURGOIS, J.; BARTHOLIN, M. C.; GUYONNET, R. **Wood Science and Technology Thermal treatment of wood: analysis of the product** **Wood Sci. Technol.** [s.l.: s.n.].
- BRAGA, A. DE P.; LUDERMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. P. DE L. F. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações (2000)**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **INTERNATIONAL FEDERATION FOR DOCUMENTATION**; [s.l.: s.n.].
- BRITO, J. O. et al. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8545–8548, 2008.
- BURATTI, C.; BARELLI, L.; MORETTI, E. Wooden windows: Sound insulation evaluation by means of artificial neural networks. **Applied Acoustics**, v. 74, n. 5, p. 740–745, 1 maio 2013.

BUSH, D. J. Genetic improvement for high-value eucalypt timber. Em: **Plantation eucalypts for high-value timber : enhancing investment through research and development**. [s.l: s.n.].

CALONEGO, F. W. et al. Physical properties of thermally modified juvenile and mature wood of *Hevea brasiliensis* (Euphorbiaceae). **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 2, p. 1–7, 2020.

CAVALCANTE, I. M. **INDÚSTRIA 4.0 E SUAS PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O BRASIL: Uma revisão sistemática da Literatura**. [s.l: s.n.].

ČERMÁK, P.; HESS, D.; SUCHOMELOVÁ, P. Mass loss kinetics of thermally modified wood species as a time – temperature function. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, p. 547–555, 2021.

DINWOODIE, J. M. **Timber Its nature and behaviour**. [s.l: s.n.]. v. 2

ESTEBAN, L. G.; FERNÁNDEZ, F. G.; DE PALACIOS, P. MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application of an artificial neural network using non-destructive testing. **Computers and Structures**, v. 87, n. 21–22, p. 1360–1365, 2009.

ESTEVEZ, B. et al. Comparison between heat treated sapwood and heartwood from *Pinus pinaster*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 1, p. 53–60, jan. 2014.

ESTEVEZ, B. M.; DOMINGOS, I. J.; PEREIRA, H. M. **Heat treatment of pine wood** *BioResources*. [s.l: s.n.].

FU, Z. et al. Artificial neural network modeling for predicting elastic strain of white birch disks during drying. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 6, p. 949–955, 1 nov. 2017.

FU, Z. et al. Assessment of mechanical properties based on the changes of chromatic values in heat treatment wood. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 152, p. 107215, 2020.

GARCÍA FERNÁNDEZ, F. et al. Prediction of standard particleboard mechanical properties utilizing an artificial neural network and subsequent comparison with a multivariate regression model. v. 17, n. 2, p. 178–187, 2008.

GONÇALEZ, J. C. et al. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, v. 20, n. 72, p. 47–58, 2001.

GRIEBELER, C. G. D. O. **COLORIMETRIA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* MODIFICADA**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1 mar. 2013.

GRIEBELER, C. G. DE O. et al. Colour responses of *Eucalyptus grandis* wood to the Brazilian process of thermal modification. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 4, p. 661–670, 1 out. 2018.

GUNDUZ, G.; AYDEMIR, D.; KARAKAS, G. The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. **Materials and Design**, v. 30, n. 10, p. 4391–4395, dez. 2009.

HAGHBAKHS, R. et al. Development of an artificial neural network model for the prediction of hydrocarbon density at high-pressure, high-temperature conditions. **Thermochimica Acta**, v. 551, p. 124–130, 10 jan. 2013.

- HAKKOU, M. et al. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 89, n. 1, p. 1–5, 2005.
- HAMZAÇEBI, C.; AKAY, D.; KUTAY, F. Comparison of direct and iterative artificial neural network forecast approaches in multi-periodic time series forecasting. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 2 PART 2, p. 3839–3844, 2009.
- HERRERA, R. et al. Characterization of hydrothermally treated wood in relation to changes on its chemical composition and physical properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 107, p. 256–266, 2014.
- HERRERA-BUILES, J. F. et al. Effect of thermal modification treatment on some physical and mechanical properties of pinus oocarpa wood. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 1–9, 1 fev. 2021.
- HILL, C. A. S. **Wood modification : chemical, thermal and other processes**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006a.
- HUMAR, M. et al. Quality control of thermally modified timber using dynamic vapor sorption (DVS) analysis. **Forests**, v. 11, n. 6, 1 jun. 2020.
- ICEL, B.; BERAM, A. Effects of industrial heat treatment on some physical and mechanical properties of iroko wood. **Drvna Industrija**, v. 68, n. 3, p. 229–239, 1 out. 2017.
- ILIADIS, L. et al. Predicting Douglas-fir wood density by artificial neural networks (ANN) based on progeny testing information. **Holzforschung**, v. 67, n. 7, p. 771–777, 1 out. 2013.
- JANIN, G. et al. AESTHETICS APPRECIATION OF WOOD COLOUR AND PATTERNS BY COLORIMETRY: PART 1. COLORIMETRY THEORY FOR THE CIELAB SYSTEM. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 3, n. 1–2, p. 03–13, 2001.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology : I Solid Wood**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 1968.
- KOROŠEC, R. C. et al. Thermogravimetry as a possible tool for determining modification degree of thermally treated Norway spruce wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 98, n. 1, p. 189–195, out. 2009.
- KUBOVSKÝ, I.; KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F. Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. **Polymers**, v. 12, n. 2, 1 fev. 2020.
- LENGOWSKI, E. C. **EFEITO DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES ANATÔMICAS, FÍSICOMECÂNICAS E QUÍMICAS DAS MADEIRAS DE Pinus taeda, Eucalyptus grandis E Tectona grandis**. Curitiba-PR: Universidade Federal do Paraná, jan. 2011.
- LOPES, D. J. V.; BOBADILHA, G. D. S.; GREBNER, K. M. A Fast and Robust Artificial Intelligence Technique for Wood Knot Detection. **BioResources**, v. 15, n. 4, p. 9351–9361, 2020.
- LOPES, D. J. V.; BURGREN, G. W.; ENTSMINGER, E. D. North American Hardwoods Identification Using Machine-Learning. **Forests**, v. 11, n. 3, p. 298, 7 mar. 2020.
- MANIA, P. et al. Optimization of Spruce (Picea abies L.) Wood Thermal Treatment Temperature to Improve Its Acoustic Properties. **BioRecursos**, v. 15, p. 505–516, 2020.

MENEZES, W. M. DE et al. Mechanical properties of thermally modified *Corymbia citriodora* and eucalyptus saligna woods. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, p. 1–6, 2019.

MENEZES, W. M. et al. Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciencia Rural**, v. 44, n. 6, p. 1019–1024, 2014.

MILLETT, M. A.; GERHARDS, G. C. Accelerated Aging: Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115 °C to 175 °C. **Wood Science**, v. 4, p. 193–201, 1972.

MOURA, L. F. DE; BRITO, J. O. Efeito da termorretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, p. 69–76, 2011.

MOURA, L. F. DE; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. EFEITOS DA TERMORRETIFICAÇÃO NA PERDA DE MASSA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE *Eucalyptus grandis* E *Pinus caribaea* VAR. *hondurensis*. **FLORESTA**, v. 42, n. 2, p. 305, 14 maio 2012.

NASIR, V. et al. Prediction of physical and mechanical properties of thermally modified wood based on color change evaluated by means of “group method of data handling” (GMDH) neural network. **Holzforschung**, v. 73, n. 4, p. 381–392, 1 abr. 2019a.

NASIR, V. et al. Prediction of physical and mechanical properties of thermally modified wood based on color change evaluated by means of “group method of data handling” (GMDH) neural network. **Holzforschung**, v. 73, n. 4, p. 381–392, 1 abr. 2019b.

NGUYEN, T. T. et al. Prediction of the color change of heat-treated wood during artificial weathering by artificial neural network. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 6, p. 1107–1116, 1 nov. 2019.

NHACILA, F. et al. Effects of thermal modification on physical and mechanical properties of Mozambican *Brachystegia spiciformis* and *Julbernardia globiflora* wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 5, p. 871–878, 1 set. 2020a.

NHACILA, F. et al. Effects of thermal modification on physical and mechanical properties of Mozambican *Brachystegia spiciformis* and *Julbernardia globiflora* wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 5, p. 871–878, 1 set. 2020b.

NUOPPONEN, M. et al. Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 24, n. 1, p. 13–26, fev. 2004.

OHASHI, H. et al. Characterization of Physiological Functions of Sapwood Fluctuation of Extractives in the Withering Process of Japanese Cedar Sapwood. **Holzforschung**, v. 44, n. 2, p. 79–86, 1990.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; DE MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalyptus saligna* and *pinus Caribaea* woods. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 239–248, 2012.

POCKRANDT, M. et al. Industrial Thermowood® and Termovuoto thermal modification of two hardwoods from Mozambique. **Holzforschung**, v. 72, n. 8, p. 701–709, 26 jul. 2018.

PONCSÁK, S. et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 647–663, dez. 2006.

RAMALHO, F. M. G. et al. Artificial Neural Networks To Distinguish Charcoal from Eucalyptus and Native Forests Based on Their Mineral Components. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 8, p. 9599–9608, 20 ago. 2020.

RAPP, A. O. **European cooperation in the field of scientific and technical research Environmental optimisation of wood protection REVIEW ON HEAT TREATMENTS OF WOOD**. Antibes, France: [s.n.].

SALCA, E. A. et al. Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers. **Journal of Wood Science**, v. 62, n. 4, p. 297–304, 1 ago. 2016.

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. **Wood modification technologies - A review**. IForestSISEF - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology, , 1 dez. 2017.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 5, p. 741–747, set. 2012.

SHUKLA, S. R. Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified *Acacia auriculiformis*. **Maderas. Ciencia y tecnología**, n. ahead, p. 0–0, 2019.

SIAU, J. F. **A Proposed Theory for Nonisothermal Unsteady-State Transport of Moisture in Wood** **Wood Sci. Technol.** [s.l.: s.n.].

SIKORA, A. et al. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. **Journal of Wood Science**, v. 64, n. 4, p. 406–416, 1 ago. 2018.

SKAAR, C.; SIAU, J. F. **Thermal Diffusion of Bound Water in Wood** **Wood Sci. Technol.** [s.l.: s.n.].

SOFUOGLU, S. D. Using Artificial Neural Networks to Model the Surface Roughness of Massive Wooden Edge-Glued Panels Made of Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.) in a Machining Process with Computer Numerical Control. **BioResources**, v. 10, n. 4, 25 ago. 2015.

STAMM, A. J. Dimensional Stabilization of Wood with Carbowaxes 1. **Forest Products Journal**, v. 6, n. 5, p. 201–204, 1956.

STAMM, A. J.; HANSEN, L. A. Minimizing Wood Shrinkage and Swelling Effect of Heating in Various Gases. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 29, n. 7, p. 831–833, 1 jul. 1937.

TANKUT, N.; TANKUT, A. N.; ZOR, M. Mechanical properties of heat-treated wooden material utilized in the construction of outdoor sitting furniture. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 38, n. 1, p. 148–158, 2014.

TIRYAKI, S.; HAMZAÇEBİ, C. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat treated woods by artificial neural networks. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 49, n. 1, p. 266–274, 2014.

TIRYAKI, S.; ÖZŞAHİN, Ş.; AYDIN, A. Employing artificial neural networks for minimizing surface roughness and power consumption in abrasive machining of wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 3, p. 347–358, 1 maio 2017.

TJEERDSMA, B. F. et al. **Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement** **Holz als Roh-und Werkstoff**. [s.l.] Springer-Verlag, 1998.

TOMASELLI, I.; BINDER, J. E. Difficulties in determining Janka hardness and suggestions for improving its precision [Physical properties of wood]. **Floresta**, 1981.

VOVELLE, C.; MELLOTTI~E, H.; DELBOURGO, R. KINETICS OF THE THERMAL DEGRADATION OF CELLULOSE AND WOOD IN INERT AND OXIDATIVE ATMOSPHERES. **Symposium (International) on Combustion**, p. 797–805, 1982.

WENTZEL, M. et al. Physico-mechanical properties of thermally modified Eucalyptus Nitens wood for decking applications. **Drvna Industrija**, v. 70, n. 3, p. 235–245, 2019.

YILDIZ, S. **Effects of heat treatment on water repellence and anti-swelling efficiency of beech wood**. IN: International Research Group on Wood Preservation. **Anais...**2002.

ZAMAN, A.; ALEN, R.; KOTILAINEN, R. Heat behavior of Pinus sylvestris and Betula pendula at 200-230 C. **Wood Fiber Sci**, v. 32, p. 138–143, 2000.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Effect of extractives on wood color of heat treated Pinus radiata and Eucalyptus pellita. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 17, n. 4, p. 857–864, 2016.

ZHANG, P. et al. Heat-induced discoloration of chromophore structures in Eucalyptus lignin. **Materials**, v. 11, n. 9, 11 set. 2018.