

EFEITO DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MADEIRAS DE *Pinus taeda* E *Eucalyptus grandis*

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF *Pinus taeda* AND
Eucalyptus grandis WOODS

Karina Soares Modes¹ Elio José Santini² Magnos Alan Vivian³
Clovis Roberto Haselein⁴

RESUMO

A presente pesquisa objetivou investigar o efeito da técnica de retificação térmica, empregada sob duas condições de tratamento, nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. De cada espécie foram amostradas três árvores com 25 anos e, de cada uma, retirada a primeira tora com 2 m de comprimento da qual foi obtida duas pranchas de dimensão 7,0 x 20,0 cm (espessura x largura, respectivamente) diametralmente opostas e destas confeccionados 30 corpos de prova para cada tratamento. No primeiro deles, denominado combinado, as madeiras foram submetidas à termorretificação em autoclave a 130/±3°C e pressão de 2 kgf/cm², por 3 horas e, após um período de condicionamento, submetidas ao calor em estufa elétrica a 160/±1°C, pelo mesmo período. O segundo tratamento consistiu apenas na termorretificação em estufa. Avaliaram-se ainda peças de madeira sem tratamento (testemunha). As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio dos ensaios para determinação dos módulos de elasticidade e ruptura em flexão estática, resistência máxima à compressão paralela à grã e dureza Janka, conforme norma ASTM D 143 (1995), e resistência ao impacto, conforme norma ABNT NBR 7190 (1997). Para a madeira de *Pinus taeda*, observou-se que o tratamento em estufa forneceu os piores resultados, tanto em função da redução nos valores de carga suportada de um maior número de propriedades mecânicas avaliadas, como em relação aos menores incrementos na resistência quando observado um aumento das mesmas atribuídas ao tratamento térmico. Na madeira de *Eucalyptus grandis*, o tratamento combinado reduziu um maior número de propriedades mecânicas da madeira.

Palavras-chave: retificação térmica; propriedades mecânicas; *Pinus*; *Eucalyptus*

ABSTRACT

This study investigated the effect of thermal treatment, employed under two treatment conditions on mechanical properties of wood of *Pinus taeda* L. and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. From each species, three 25-year trees were sampled, and from each one, it was taken the first 2-meter long log, which was obtained from two boards of size 7,0 x 20,0 cm (thickness x width respectively) diametrically opposite from where 30 specimens were saw for each treatment. At the first one, called the combined one, the woods were subjected to heat treatment by autoclaving at 130 / ± 3°C and pressure of 2 kgf / cm² for 3 hours and, after a conditioning period, subjected to heat in an electric oven at 160 / ± 1°C for the same period. The second treatment consisted only of heat treatment in oven. It was also evaluated the pieces of wood

1 Engenheira Florestal, Dra., Professora do Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Catarina, Rodovia Ulysses Gaboardi, Km 3, CEP 89520-000, Curitibaanos (SC), Brasil. karina.modes@ufsc.br

2 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. ejsantini@gmail.com

3 Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Catarina, Rod Ulysses Gaboardi, km 3, CEP 89520-000, Curitibaanos (SC), Brasil. magnos.alan@ufsc.br

4 Engenheiro Florestal, PhD., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. clovis.haselein@ufsm.br

without treatment (control). The mechanical properties were evaluated by means of tests for determining the modulus of elasticity and rupture in bending, maximum resistance to compression parallel to the grain and Janka hardness according to ASTM D 143 (1995), and the impact resistance according to ABNT NBR 7190 (1997). For *Pinus taeda* wood, it was observed that treatment in an oven gave the worst outcomes, both due to the reduction in the values of supported load of a greater number of mechanical properties evaluated, but also as compared to the lowest increments in resistance when it was observed an increase to the same ones with heat treatment. In *Eucalyptus grandis*, the combined treatment decreased the greatest number of mechanical properties of wood.

Keywords: heat treatment; mechanical properties; *Pinus*; *Eucalyptus*

INTRODUÇÃO

A madeira é um material que apresenta propriedades que a torna matéria-prima preferida para uma variedade de aplicações, mas possui também características por vezes indesejáveis como alta higroscopicidade, heterogeneidade e anisotropia, das quais deriva grande parte dos problemas apresentados em seu uso. Estas características, próprias da madeira, geram a necessidade da aplicação de tratamentos que permitam minimizá-las visando a seu melhor comportamento em uso.

A técnica de retificação térmica ou termorretificação consiste em submeter peças de madeira a temperaturas entre 120 e 200°C, faixa entre a secagem à alta temperatura e à temperatura de torrefação, com objetivo de promover sensíveis alterações químicas nos polímeros celulose, hemicelulose e lignina e, assim, obter um material com características diferenciadas, comparativamente à madeira em condições normais; como menor higroscopicidade, maior estabilidade dimensional e resistência biológica.

Nesse sentido, o tratamento térmico da madeira surge como alternativa para diversificar a utilização que já é dada a madeiras como as do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*, ampliando seu potencial econômico, já que estas, apesar de disponíveis em escala comercial, sofrem limitações tecnológicas limitando seu emprego para um fim específico.

O grau das transformações sofridas pelos polímeros constituintes da madeira e, conseqüentemente, dos efeitos atribuídos ao tratamento de retificação térmica, é condicionado por fatores como temperatura e duração do tratamento, taxa de aquecimento, atmosfera circundante, uso de pressão, água ou apenas ar quente, além da interação com a espécie utilizada. Da mesma maneira, influenciam na magnitude das alterações da estrutura interna da madeira e, conseqüente, perda de resistência mecânica, advinda do emprego de temperaturas elevadas. Portanto, os parâmetros do tratamento devem ser otimizados para manter essa perda em um nível mínimo, enquanto melhoram outras propriedades, sendo que disso vai depender o uso final da madeira (PONCSAK et al., 2006).

No que se refere à atmosfera circundante, no decorrer do processo, Wangaard (1950) cita que o comportamento da degradação da madeira é diferenciado, conforme o meio de aquecimento utilizado. Na presença de vapor, a madeira pode ser mais facilmente degradada do que na presença de água líquida, que, por sua vez, é maior que a degradação, em função apenas da temperatura. Esse fenômeno ocorre porque as hemiceluloses e celulose são despolimerizadas via hidrólise, na presença da água, sendo esta a principal causa de perda da resistência à degradação por estes polímeros.

Em alta umidade relativa, a madeira degrada predominantemente por hidrólise ácida e a taxa de degradação, nesse caso, é maior que a degradação térmica ou pirolítica. Na primeira, a água faz com que sejam quebrados os grupos acetilas, com a formação de ácido acético, responsável pela degradação da madeira. Deve-se, no entanto, considerar que o excesso de água reduz a quantidade de oxigênio no ar, podendo retardar a reação da hidrólise (SEVERO; TOMASELLI, 2003).

Stamm (1956) mostrou que a madeira aquecida em atmosfera com a presença de oxigênio é degradada mais rapidamente que a madeira aquecida em atmosfera livre desse devido às reações de oxidação. Esteves, Domingos e Pereira (2008) explicam que isso acontece porque o ácido acético, produzido nesse processo, atua como um catalizador das reações de despolimerização, em virtude de existir um alto conteúdo de ácido acético liberado num ambiente oxidante.

Diferenças na degradação dos componentes da madeira também têm sido encontradas entre amostras tratadas em sistemas abertos e fechados. Isso é porque existirá um acúmulo de compostos como o

ácido acético em sistemas fechados, que podem então interagir como um catalisador das reações químicas. Existem interações não apenas entre os componentes encontrados dentro da madeira, mas também entre a madeira e a atmosfera de tratamento (JOHANSSON, 2008).

Dentre os componentes estruturais, o principal componente da parede celular de folhosas e coníferas é a celulose, um polímero linear de grau de polimerização elevado, responsável por grande parte das propriedades da madeira. As hemiceluloses são polímeros ramificados com grau de polimerização baixo e que funcionam como um material de enchimento na qual está imersa a celulose. O último componente estrutural é a lignina, uma substância amorfa com estrutura tridimensional que é responsável pela rigidez da parede celular e consequente resistência mecânica (MORAIS et al., 2005).

Dentro da faixa em que se encaixa o tratamento de retificação térmica (120 a 200°C), observa-se que as hemiceluloses sofrem alterações consideradas fortes, a celulose, pequenas alterações e a lignina, um princípio de fortes alterações químicas. Embora a lignina comece a sofrer alterações químicas e estruturais severas em um patamar anterior à celulose, essa reação é mais lenta, ultrapassando os limites da temperatura de torrefação da madeira, por isso, vem a ser considerada como mais resistente à ação de altas temperaturas.

Entre os constituintes da madeira, as hemiceluloses têm demonstrado ser as menos estáveis, por isso podem ser facilmente degradadas nos estágios iniciais do aquecimento, resultando em perda direta da resistência da madeira. Essa perda de resistência das hemiceluloses na ação de temperaturas elevadas deve-se à ausência de cristalinidade, baixa massa molecular, configuração irregular e ramificada, o que facilita a absorção de água e, conseqüentemente, a degradação (SEVERO; TOMASELLI, 2003).

A degradação da hemicelulose também tem sido proposta como o principal fator para a perda de resistência mecânica da madeira, bem como a cristalinidade da celulose amorfa (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Um dos fatores que contribui para a perda de resistência é que o tratamento de termorretificação resulta em perda de massa pela madeira, dependendo da temperatura e tempo de exposição ao tratamento (GUNDUZ et al., 2009).

Segundo Esteves e Pereira (2009), a degradação das hemiceluloses, em produtos voláteis, e a evaporação de extrativos são as principais razões para a redução da massa específica da madeira. Durante a termorretificação, há uma perda de umidade de aproximadamente 30% de massa, constituída pelos subprodutos, provenientes da degradação da madeira e da umidade contida na mesma, sendo esta massa composta por 50,4% de água, 20,7% de condensáveis (ácido pirolenhoso, furfural, ácido acético) e 28,9% de gases não condensáveis (CO₂, N₂, CO).

O menor conteúdo de umidade de equilíbrio pode afetar positivamente as propriedades de resistência da madeira tratada, mas esse efeito é superado pela degradação dos componentes químicos da madeira (AZEVEDO; QUIRINO, 2006). Porém, os resultados dos estudos demonstrando o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira são, até o momento, contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura, sendo essa divergência nos resultados relacionada principalmente às diferentes formas de condução dos tratamentos (AZEVEDO; QUIRINO, 2006).

De acordo com Unsal, et al. (2003), em relação às propriedades de resistência, ao se considerar a utilização de tratamentos prolongados manifesta-se um menor efeito sobre o módulo de elasticidade e, maior sobre a resistência ao impacto e à flexão estática (MOR).

As mudanças ocorridas na estrutura da madeira em temperaturas inferiores a 160°C são desprezíveis (SILVA et al., 2008). De acordo com Vernois (2000), dependendo da espécie, as propriedades mecânicas com a utilização de tratamentos a temperaturas de até 210°C permanecem próximas das originais, no entanto, na temperatura de 230°C são observados decréscimos nos módulos de ruptura (MOR), que podem chegar perto de 40%, tornando a madeira mais frágil e quebradiça. Em espécies de maiores massa específicas, essa redução é mais acentuada devido à tendência do tratamento térmico induzir a formação de rachaduras nas peças.

Nesse sentido, desenvolveu-se o presente estudo objetivando avaliar o efeito do tratamento de retificação térmica, empregado sob duas diferentes condições de aquecimento sobre as propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção e preparo do material

As madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus taeda* L. foram obtidas de plantios pertencentes à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – FEPAGRO Florestas, localizada em Boca do Monte, distrito de Santa Maria – RS, Estado do Rio Grande do Sul. Para cada espécie foram amostradas três árvores, com aproximadamente 25 anos de idade e, de cada árvore, retirada a primeira tora com 2 m de comprimento, da qual foram confeccionadas duas pranchas de dimensão 7,0 x 20,0 cm (espessura x largura, respectivamente) diametralmente opostas. Essas pranchas foram encaminhadas ao Laboratório de Produtos Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e, com auxílio de uma serra circular, realizada a confecção de corpos de prova que foram posteriormente separados em três lotes, sendo que um deles correspondeu às amostras sem tratamento térmico (testemunha) e os outros dois submetidos às duas diferentes metodologias de tratamento. Depois de confeccionado, todo o material permaneceu em câmara climatizada a 20°C e 65% de umidade relativa até equilíbrio higroscópico.

Condução do tratamento de termorretificação

Atingido o equilíbrio higroscópico foi determinada a massa específica aparente a 12% de umidade dos corpos de prova antes de serem submetidos a duas metodologias de termorretificação: 1ª) madeira tratada previamente em autoclave e, após um período de climatização (20°C e 65% de umidade relativa), submetida ao tratamento em estufa (denominado combinação); 2ª) madeira tratada somente em estufa (denominado estufa). Os corpos de prova referentes às amostras testemunha (madeira sem tratamento) permaneceram no condicionamento.

A descrição das duas metodologias de tratamento térmico consta na Figura 1, sendo o tempo de duração dos tratamentos contabilizado depois de atingida a temperatura requerida.

Para o tratamento térmico do material utilizou-se uma autoclave de laboratório com dimensões

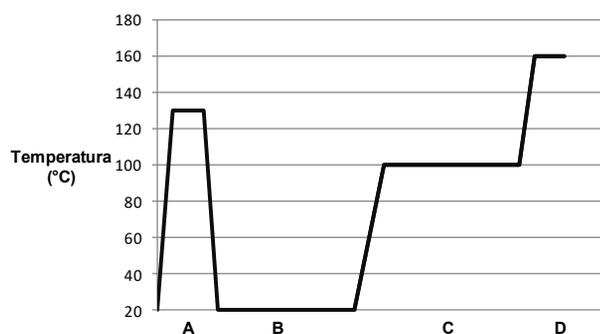


FIGURA 1: Fases dos tratamentos de combinação e estufa: A + B = Tratamento em estufa; A + B + C + D = Tratamento combinado. Sendo: (A) Tratamento de termorretificação em autoclave à temperatura de $130\pm 3^{\circ}\text{C}$ e pressão de 2 kgf/cm^2 por 3 horas; (B) Período de condicionamento em câmara climatizada a 20°C 65% de umidade relativa até massa constante; (C) Secagem prévia em estufa a $100\pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 horas; (D) Tratamento de termorretificação em estufa elétrica a $160\pm 1^{\circ}\text{C}$ por 3 horas.

FIGURE 1: Phases of treatments of combination and oven. A + B = Heat treatment in an oven; A + B + C + D = combined treatment. (A) Heat Treatment by autoclaving at $130\pm 3^{\circ}\text{C}$ and pressure of 2 kgf/cm^2 for 3 hours; (B) Period of conditioning in chamber at 20°C 65% RH to constant weight; (C); drying prior in an oven at $100\pm 1^{\circ}\text{C}$ for 24 hours; (D) Heat Treatment in electric oven at $160\pm 1^{\circ}\text{C}$ for 3 hours.

internas aproximadas de 79 x 85 x 125 cm (capacidade de 225 litros) e uma estufa elétrica, com circulação de ar e controle digital de temperatura.

Testes mecânicos

Depois de tratadas, as peças retornaram à sala de climatização e, após novo condicionamento à umidade de equilíbrio de 12%, foram submetidas aos testes mecânicos que consistiram na determinação do módulo de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) em flexão estática, dureza Janka, resistência máxima em compressão paralela às fibras, conforme norma ASTM D 143 (1994), em máquina universal de ensaios com capacidade de 20 toneladas. O ensaio de resistência máxima ao impacto foi realizado conforme norma ABNT NBR 7190 (1997), por meio de um Pêndulo de Charpy.

Análise estatística

Os dados referentes ao presente estudo foram processados e analisados a partir da construção de um banco de dados e utilização do *software* Statistical Package for Social Science versão 15.0 (SPSS 15.0). As médias das variáveis referentes às propriedades mecânicas e de massa específica aparente foram analisadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro e o método não paramétrico de Kruskal-Wallis, adotado quando observada não normalidade dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 e 3 consta a percentagem de alteração dos valores de propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, respectivamente, termorretificadas pelos dois tratamentos utilizados, em relação à testemunha. Os valores negativos e positivos indicam que a média da propriedade da madeira tratada foi, respectivamente, menor ou maior que a média da testemunha.

Na Figura 2 observa-se que, com relação à resistência máxima da madeira de *Pinus taeda* à compressão paralela (RM), o tratamento térmico, embora sem influência significativa, reduziu os valores dessa propriedade em maior grau com o tratamento em estufa, 7,97%, inferior à testemunha, seguido do tratamento combinado, resultando em uma média de valores inferior à testemunha em 6,79%.

Yildiz, Gezer e Yildiz (2006), avaliando madeira de *Picea orientalis* tratada a 180°C por 2h, obtiveram uma redução inferior em aproximadamente 5,90% em relação à madeira sem tratamento. Boonstra et al. (2007) encontraram um acréscimo no valor de resistência à compressão paralela em estudo com a madeira de *Pinus sylvestris* L., no qual a madeira tratada apresentou um valor de resistência superior à testemunha em 28,7%. Korkut, Akgul e Dundar (2007), por sua vez, ao submeterem a madeira de *Pinus sylvestris* L. à temperatura a 150°C por 2 horas observaram uma redução de 8,02% na resistência máxima à compressão, ou seja, superior à obtida no presente estudo.

Quanto ao MOE da madeira de pinus, constatou-se um aumento devido ao tratamento combinado, superando em 3,99% a carga obtida para a testemunha, ao passo que o tratamento em estufa reduziu o valor dessa propriedade em 2,20%. Esse valor foi praticamente o mesmo encontrado por Esteves, Domingos e Pereira (2008), estudando o efeito da temperatura de 180°C por 2h sobre o MOE da madeira de *Pinus pinaster* Aiton. em flexão estática, obtendo uma redução de 2%.

Boonstra et al. (2007), em estudo com a madeira de *Picea abies* Karst, tratada na presença de vapor e pressão a 165°C por 30 min, seguido de tratamento de calor em condições secas e a pressão atmosférica a 180°C por 6h, também encontraram um acréscimo no MOE da madeira tratada, mas em 5,21%, um pouco superior ao registrado neste estudo.

O MOR em flexão estática para a madeira de pinus foi menor nos dois tratamentos térmicos em relação à testemunha, sendo encontrada no tratamento em estufa uma maior redução (-7,15%), e significativamente diferente da observada para o tratamento-testemunha em nível de 5% de probabilidade.

Também estudando o efeito do tratamento sobre o MOR, Boonstra et al. (2007) observaram na madeira de *Pinus sylvestris* L. uma redução de 3,16% dessa propriedade, atribuída ao tratamento empregado. Korkut et al. (2007) observaram para a madeira de *Pinus sylvestris* L. uma maior redução no MOR, da

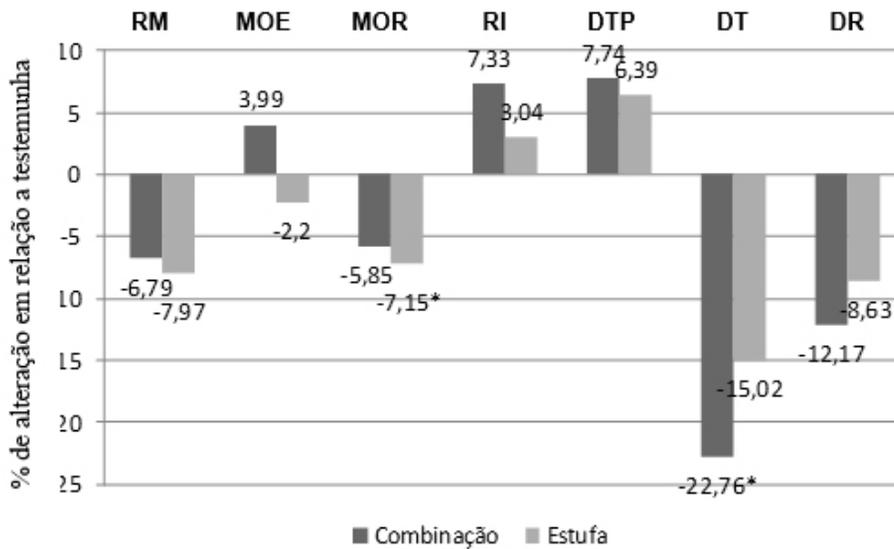


FIGURA 2: Percentagem de alteração das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* em relação à testemunha. Em que: RM = Resistência máxima à compressão paralela, kgf/cm²; MOE = Módulo de elasticidade em flexão estática, kgf/cm²; MOR = Módulo de ruptura em flexão estática, kgf/cm²; RI = Resistência ao impacto, kJ m²; DTP = Dureza de topo, kgf; DT = Dureza de superfície (tangencial), kgf; DR = Dureza de superfície (radial), kgf; * = médias estatisticamente diferentes da testemunha em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

FIGURE 2: Percentage change the mechanical properties of wood of *Pinus taeda* in relation to witness. (MR = Maximum resistance to compression parallel, kgf/cm²; MOE = Modulus of elasticity in bending, kgf/cm²; MOR = Modulus of rupture in bending, kgf/cm²; IR = Impact Strength, kJ m²; DTP = top hardness, kgf; DT = surface hardness (tangential), kgf; DR = surface hardness (radial), kgf; *= statistically different from the control mean at 5% error probability by Tukey test.

ordem de 11,08% inferior à madeira sem tratamento.

No que se refere à resistência ao impacto, a madeira de pinus apresentou maiores valores depois dos tratamentos térmicos, sendo essa diferença mais pronunciada em relação à testemunha no tratamento de combinação. Para o pinus, o valor de carga para romper a madeira tratada pelo tratamento combinado superou a testemunha em 7,33%, e o tratamento em estufa necessitou de uma carga superior em 3,04%.

Nessa espécie, principalmente, bem como na madeira de eucalipto, pode-se observar que os tratamentos empregados, especialmente o de combinação, tornaram as peças quebradiças, fato comprovado pelo forte cisalhamento observado nas peças testadas.

Johansson (2008) também observou um cisalhamento das amostras submetidas ao teste de resistência ao impacto, e informou que altas temperaturas e longos tempos de duração do tratamento resultam em alta percentagem de fratura de cisalhamento. Essas mudanças no tipo de fratura são provavelmente devido à redução da resistência entre as fibras, que é altamente dependente da estrutura da lignina. Isso quer dizer que a redução na força de cisalhamento pode ser resultado de fatores como: mudanças na estrutura da lignina, isto é, alteração na forma como a lignina une-se à hemicelulose, ou a um aumento da fragilidade devido a um aumento das ligações cruzadas dentro do complexo de lignina.

Para a dureza de topo da madeira de pinus foi observado maior incremento de carga requerida pelo tratamento combinado, seguido daquele em estufa, proporcionando uma elevação dos valores de carga em 7,74% e 6,39%, respectivamente, em relação à testemunha.

Da mesma forma, Ates, Akyildiz e Ozdemir (2009), após tratarem a madeira de *Pinus brutia* Ten. a 180°C por 2 h também observaram um aumento da dureza de topo em 7% em relação à madeira em condições normais, valor similar ao encontrado no presente estudo.

De acordo com Boonstra et al. (2007), o tratamento térmico pode, portanto, contribuir positivamente na propriedades mecânicas pelo fato de que a madeira tratada termicamente tem sua capacidade de trocar água reduzida com o meio e, assim, o baixo conteúdo de umidade torna a madeira mais resistente a esforços mecânicos, compensando os efeitos atribuídos à perda de massa. Desse modo, como a madeira tende a perder mais umidade pelos topos o aumento da dureza no plano transversal pode ser justificado.

Com relação ao aumento de algumas propriedades mecânicas verificadas na madeira, Sundqvist (2004) cita que parece possível aumentar ligeiramente a resistência e dureza da madeira em comparação com a madeira em condições normais dentro de certos domínios da relação tempo/temperatura. Um aumento inicial na resistência e dureza pode ser decorrente dos processos de condensação da lignina e celulose como moléculas degradadas, podendo formar novas ligações químicas.

Quanto à dureza Janka, nos planos tangencial e radial da madeira de pinus, observa-se que os tratamentos térmicos promoveram a redução nas resistências das peças, mais pronunciada pelo tratamento combinado, cujos valores no plano tangencial diferiram estatisticamente da testemunha.

Para o ensaio de dureza Janka no plano tangencial observa-se que as médias obtidas das peças tratadas foram inferiores à testemunha em 22,76% e 15,02% no tratamento combinado e em estufa, respectivamente, e no plano radial, a redução foi menos expressiva, com valores na mesma ordem inferiores em 12,17 e 8,63%.

Da mesma forma que para o MOR, pode-se inferir que a diferença estatística apresentada por essa propriedade em relação à testemunha é atribuída ao efeito do tratamento térmico empregado, já que a análise de variância da massa específica média dos corpos de prova de cada tratamento não acusou diferença estatística entre os mesmos.

Sundqvist (2004) descreveu não observar mudanças nas propriedades originais da madeira submetida a 160°C, mas que, entretanto, a dureza foi afetada.

Grau de redução similar ao observado no presente estudo para a dureza no plano tangencial e radial também foi encontrado por Korkut et al. (2008), para a madeira de *Pinus sylvestris* L., submetida ao tratamento a 150°C. Os autores encontraram reduções em 14,68% e 18,31% no plano tangencial para o tratamento de 2 e 6 h, respectivamente e 10,65% e 13,80% no plano radial.

Em relação ao comportamento da compressão paralela em madeiras tratadas de *Eucalyptus grandis*, (Figura 3), percebe-se que, ao contrário de *Pinus taeda*, o tratamento térmico possibilitou um incremento na resistência das peças, com o tratamento de combinação apresentando os maiores valores seguido do tratamento em estufa. O tratamento de combinação forneceu um acréscimo em 8,47% nos valores de carga em relação à testemunha e no tratamento em estufa este acréscimo foi de 6,07%.

Efeito contrário foi descrito por Unsal e Ayrilmis (2005), referindo-se à madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, sendo que, quando o tratamento térmico foi aplicado à temperatura de 150°C durante 2 e 6h, encontraram uma redução dessa propriedade (compressão paralela) em 4,29 e 8,40%, respectivamente.

Também Gunduz et al. (2009), ao submeteram a madeira de *Carpinus betulus* L. ao tratamento em estufa a 170°C por 4h, encontraram uma carga inferior em 6,54% em relação à madeira sem tratamento.

Efeito diferenciado também foi obtido por Gunduz, Aydemir e Karakas (2009), ao investigarem o efeito do tratamento térmico a 160°C por 2h sobre a madeira de *Pyrus elaeagnifolia* Pall., observando uma redução desta variável na ordem de 7,42%.

Segundo Boonstra et al. (2007), essa maior resistência atribuída ao tratamento térmico pode ser explicada pelo aumento do montante de celulose cristalina altamente ordenada, devido à degradação e/ou cristalização da celulose amorfa. Essa celulose cristalina mostra significativa anisotropia, e sua estrutura rígida pode ser responsável pelo aumento da resistência à compressão longitudinal. Outra explicação talvez seja devido a um aumento nas ligações cruzadas da rede polimérica da lignina. Para esses autores, a lignina atua como um reforçador das microfibrilas de celulose, e um aumento da ligação cruzada desse polímero parece impedir ou limitar o movimento perpendicular à grã (que ocorre durante a compressão paralela à grã). Além disso, a lignina é o principal componente da lamela média e um aumento desse fenômeno melhora a resistência da lamela média que, conseqüentemente, afeta as propriedades de resistência da peça

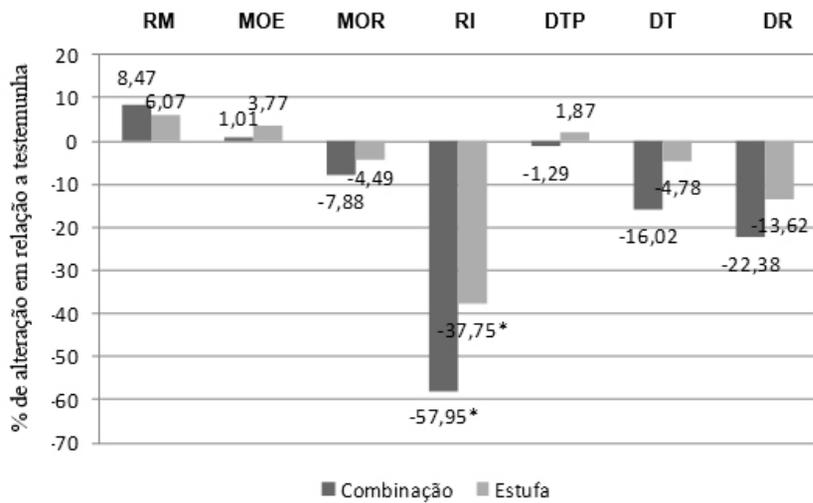


FIGURA 3: Percentagem de alteração das propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* em relação à testemunha. Em que: RM = Resistência máxima à compressão paralela, kgf/cm²; MOE = Módulo de Elasticidade em flexão estática, kgf/cm²; MOR = Módulo de Ruptura em flexão estática, kgf/cm²; RI = Resistência ao impacto, k/J m²; DTP = Dureza de topo, kgf; DT = Dureza de superfície (tangencial), kgf; DR = Dureza de superfície (radial), kgf; * = médias estatisticamente diferentes da testemunha em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

FIGURE 3: Percentage change of the mechanical properties of wood of *Eucalyptus grandis* in relation to witness. (MR = Maximum resistance to compression parallel, kgf/cm²; MOE = Modulus of elasticity in bending, kgf/cm²; MOR = Modulus of rupture in bending, kgf/cm²; IR = Impact Strength, kJ m²; DTP = top hardness, kgf; DT = surface hardness (tangential), kgf; DR = surface hardness (radial), kgf; *= statistically different from the control mean at 5% error probability by Tukey test.

de madeira como um todo.

Nesse mesmo sentido, Yildiz, Gezer e Yildiz (2006), examinando as mudanças na estrutura química (celulose, hemicelulose e lignina) da madeira tratada sob diferentes temperaturas e duração do tratamento, concluíram que o conteúdo de lignina, ao contrário da celulose e hemicelulose exibiu um aumento a partir dos tratamentos mais agressivos.

Para o MOE da madeira de eucalipto, os tratamentos pelas duas metodologias forneceram um acréscimo nos valores dessa propriedade, principalmente em estufa, 3,77% seguido do tratamento combinado, 1,01% superior à madeira sem tratamento. Santos (2000) também verificou aumento no módulo de elasticidade da madeira de eucalipto tratada a 180°C.

Um aumento dessa mesma propriedade foi encontrado por Gunduz, Aydemir e Karakas (2009), que observaram um acréscimo no MOE em 2,11% para a madeira de *Pyrus elaeagnifolia* Pall., tratada em forno a 160°C durante 4h. Justificaram o resultado pelo aumento das ligações cruzadas (vinculação) na rede de lignina, uma vez que é esperado que esse fenômeno melhore a estrutura rígida em torno das microfibrilas de celulose e da resistência característica da lamela média. O outro fenômeno que pode afetar essa propriedade são as propriedades termoplásticas da madeira: acima de certa temperatura, as características físicas da hemicelulose (127 a 235°C), lignina (167 a 217°C) e celulose (231 a 253°C) mudam para um estado similar ao da borracha ou do plástico, embora o vapor possa reduzir a extensão destas faixas, devido à água atuar como um agente plastificante. No resfriamento, as fases desses componentes se tornam mais rígidas e a estrutura molecular do polímero pode ser alterada, o que provavelmente afeta a interação entre os principais componentes de madeira e, por conseguinte, as propriedades de resistência.

Esteves e Pereira (2009) inferem que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da

cristalinidade da celulose e com a redução do conteúdo de umidade. O efeito da cristalinidade prevalece no início do tratamento, mas com a continuidade do mesmo, a estrutura da madeira é alterada pelo efeito da temperatura, levando a uma redução dessa variável.

Para o MOR também foram observadas reduções nos valores de carga requerida para ruptura, sendo que as maiores reduções se deram pelo tratamento combinado, inferior à testemunha em 7,88%, e o tratamento em estufa com uma redução de 4,49%.

Gunduz, Aydemir e Karakas (2009) ao submetterem madeira de *Pyrus elaeagnifolia* Pall. em tratamento térmico por 2 horas à temperatura de 160°C, observaram também uma redução dessa propriedade em 7,56%, bem próxima ao obtido para a madeira de pinus.

Boonstra et al. (2007) explicam que esse efeito sobre o MOR em flexão é decorrente das mudanças no teor e estrutura da hemicelulose com o tratamento térmico. O aumento da temperatura e/ou do tempo de tratamento causa uma redução mais acentuada desse polímero com correspondente perda da resistência. Também a resistência à flexão é uma combinação das tensões internas na madeira (estresse de tração, compressão e cisalhamento), de maneira que também deve ser explorada como essas forças são afetadas pela degradação da hemicelulose.

Foram visíveis para ambas as espécies submetidas aos tratamentos térmicos, a quebra abrupta da madeira. Segundo Boonstra et al. (2007), a energia consumida até a fratura total é menor nas amostras tratadas do que para as amostras não tratadas. As forças externas que a madeira tratada pelo calor pode suportar após a falha são muito menores do que para a madeira não tratada.

Em relação à resistência ao impacto de *Eucalyptus grandis* ocorreu um efeito contrário ao obtido para a madeira de pinus. Para a madeira de eucalipto tratada por ambos os tratamentos, observou-se uma redução drástica e estatisticamente significativa da resistência ao impacto em relação à madeira sem tratamento, que foi também mais pronunciada no tratamento combinado. Nessa espécie, a madeira tratada pelos métodos em estufa e combinação necessitou, para seu rompimento, de cargas inferiores à testemunha em 37,75% e 57,95%, respectivamente.

Valores similares de redução da resistência ao impacto foram encontrados por Sundqvist, Karlsson e Westermark (2003) aplicando o tratamento de 160°C por 2,5h a madeira de *Betula pubescens* na presença de água, com uma redução dos valores de resistência ao choque na ordem de 31,03% em relação à madeira original.

Conforme Gunduz, Aydemir e Karakas (2009), alguns métodos de tratamento provocam forte redução da resistência ao impacto e resistência à flexão, enquanto outros promovem pouco ou nenhum efeito sobre essas propriedades. Para Davis e Thompson (1964), a degradação das hemiceluloses é o principal responsável pela redução.

Uma vez que as interações entre celulose e hemicelulose são baseadas em ligações secundárias, isso implica que deve ser a quebra dessas ligações que determina a resistência ao impacto. Contudo, contribui na redução bastante elevada da força de impacto, a quebra de ligações covalentes entre a hemicelulose e lignina durante o processo térmico, bem como a quebra de ligações covalentes nas microfibrilas/fibras de celulose (despolimerização). Um aumento da quantidade de celulose cristalina devido à degradação e/ou cristalização da celulose amorfa também pode ter um efeito negativo sobre a força de impacto.

Para os valores de carga média suportada pelos corpos de prova de eucalipto no ensaio de dureza Janka na direção longitudinal (topo), o tratamento em estufa resultou em uma maior resistência mecânica deste plano pelo tratamento em estufa, superior à testemunha em 1,87% e, em contrapartida, o tratamento combinado causou uma redução de 1,29%.

Quanto aos valores de carga para a dureza na madeira de eucalipto tem-se que no plano tangencial estes valores foram, para o tratamento de combinação, inferiores à testemunha em 16,02% e o tratamento em estufa inferior em 4,78%, enquanto para o plano radial, o método de combinação foi inferior à testemunha em 22,38% e o tratamento em estufa inferior em 13,62%.

Empregando temperatura de 160°C durante 2,5h, Sundqvist, Karlsson e Westermark (2003) não observaram alterações nas propriedades mecânicas originais da madeira testada. Porém, no que se refere à dureza, foi a propriedade mais afetada.

Assim como no presente estudo, Korkut et al. (2008) aplicando a temperatura de 150°C por 2h na madeira de *Abies bornmuelleriana* Mattf., também encontrou uma menor redução nos valores de dureza

para o plano anatômico radial, seguida da tangencial e da longitudinal, com valores inferiores à testemunha em 16,46%, 9,34% e 4,04%, respectivamente.

Unsal, Korkut e Atik (2003) trabalhando com a madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, tratada à temperatura de 150°C por 2h, registraram uma redução de 9,94%, 8,51% e 7,33% para os mesmos planos anatômicos.

Com relação às diferenças observadas nas propriedades de resistência entre espécies submetidas ao mesmo tratamento de calor, Boonstra et al. (2007) esclarecem que essas podem estar relacionadas às diferenças de estrutura anatômica e ultraestrutural, maior conteúdo de hemicelulose ou sua composição química diferenciada, que afeta o mecanismo de reação química durante o tratamento, e maior percentagem de madeira juvenil, que por sua vez contém maior conteúdo de hemicelulose, lignina e maior ângulo microfibrilar, resultando em uma maior contração longitudinal e menor transversal, causando tensões internas agravadas pela agressividade na secagem pelos tratamentos.

A degradação da hemicelulose tem sido proposta por Esteves e Pereira (2009) como o principal fator para a perda da resistência mecânica da madeira, afetando especialmente a flexão e resistência à tração, além do efeito atribuído à cristalização da celulose amorfa. Já as reações de policondensação da lignina, resultando em ligações cruzadas, são mencionadas como tendo um impacto positivo, principalmente nos esforços da direção longitudinal da madeira, e diferenças entre a resistência à compressão paralela à fibra (aumento) e a compressão radial (redução) são atribuídas à anisotropia da celulose cristalina. Descrevem ainda que o menor conteúdo de umidade de equilíbrio pode afetar positivamente as propriedades de resistência da madeira tratada, mas esse efeito é muitas vezes superado pela degradação dos componentes químicos.

CONCLUSÕES

O efeito dos tratamentos térmicos foi diferenciado entre as espécies estudadas. Em relação à resistência máxima à compressão paralela e resistência ao impacto foi observado que os tratamentos térmicos promoveram uma redução da resistência para a madeira de *Pinus taeda*, e um aumento das mesmas propriedades para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Houve diferença entre o efeito dos tratamentos térmicos para uma mesma propriedade, sendo que para a madeira de *Pinus taeda* esse comportamento foi observado para o módulo de elasticidade, com um aumento dessa propriedade pelo tratamento de combinação e uma redução da mesma pelo tratamento em estufa. Para a madeira de *Eucalyptus grandis* essa diferença entre os tratamentos foi observada para a dureza de topo, resultando em uma redução dessa propriedade pelo método combinado e um incremento pelo tratamento em estufa.

Observa-se, para ambas as espécies, que as propriedades relacionadas ao módulo de ruptura e dureza de superfície tangencial e radial foram influenciadas negativamente pelos dois tratamentos térmicos empregados, resultando em uma redução dos valores de resistência em relação a madeiras não submetida aos tratamentos.

Para a madeira de *Pinus taeda* observou-se que o tratamento em estufa foi o que promoveu redução tanto em função do maior número de propriedades avaliadas como em função da magnitude com que ambas ocorreram, podendo-se citar a resistência máxima à compressão paralela, módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Já a dureza de superfície tangencial e radial foi influenciada negativamente de modo menos expressivo em comparação com o tratamento combinado.

Para a madeira de *Eucalyptus grandis*, o tratamento combinado reduziu a resistência mecânica de um número maior de propriedades, bem como proporcionou as maiores reduções em valores, tais como as relacionadas ao módulo de ruptura, resistência ao impacto, dureza de topo e dureza de superfície tangencial e radial.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143**. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, 1995. 31 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ATES, S.; AKYILDIZ, M. H.; OZDEMIR, H. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. **Bioresources**, Raleigh, v. 4, n. 3, p. 1032-1043, 2009.
- AZEVEDO, A. C. S.; QUIRINO, W. F. Aumento da estabilidade na madeira de eucalipto através de tratamento térmico. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 16, n. 98, p. 50-58, ago. 2006.
- BOONSTRA, M. J. et al. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.
- DAVIS, W. H.; THOMPSON, W. S. Influence of thermal treatments of short duration on the toughness and chemical composition of wood. **Forest Products Journal**, Norcross, v. 14, n. 8, p. 350-356, 1964.
- ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I. L.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **BioResources**, Raleigh, v. 3, n. 1, p. 142-154, 2008.
- ESTEVES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, Raleigh, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.
- GUNDUZ, G. et al. The density, compression strength and surface hardness of heat treated hornbeam (*Carpinus betulus*) wood. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v. 11, n. 1, p. 61-70, 2009.
- 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 & Design**, Oxford, v. 30, n. 10, p. 4391-4395, 2009.
- JOHANSSON, D. **Heat treatment of solid wood**: effects on absorption, strength and colour. 2008. 142 f. Doctoral thesis (Divisions of wood Physics) – Lulea University of Technology, Sweden, 2008.
- KAFKAS, F. et al. Determination of residual stresses based on heat treatment conditions and densities on a hybrid (FLN2-4405) powder metallurgy steel using artificial neural network. **Materials and Design**, v. 28, n. 9, p. 2431-2442, 2007.
- KORKUT, D. S. et al. The effects of heat treatment on the physical properties and surface roughness of Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) wood. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 9, n. 9, p. 1772-1783, 2008.
- KORKUT, S.; AKGUL, M.; DUNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Bioresource Technology**, Trivandrum, v. 99, n. 1, p. 1861-1868, 2007.
- MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 145-155, 2005.
- PONCSAK, S. et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, Vancouver, v. 1, n. 40, p. 647-663, 2006.
- SANTOS, J. A. Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, Vancouver, v. 34, n. 1, p. 39-43, 2000.
- SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre a flexão estática. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 29, n. 3, p. 37-51, 2003.
- SILVA, M. R.; MACHADO, G. O.; GOMES JUNIOR, C. C. Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de *Pinus elliotti*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: UEL - EBRAMEM, 2008.
- STAMM, A. J. Thermal degradation of wood and cellulose. **Industrial and Engineering Chemistry**, Austin, v. 48, n. 3, p. 413-417, 1956.
- SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 2004. 154 f. Doctoral thesis (Divisions of wood material science) – Lulea University of Technology, Sweden, 2004.
- SUNDQVIST, B.; KARLSSON, O.; WESTERMARK, U. Determination of formic acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 52, n. 2, p. 30-37, 2003.
- UNSAI, O.; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 51, n. 4, p. 405-409, 2005.

UNSAI, O.; KORKUT, S.; ATIK, C. The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) wood. **Maderas, Ciência y Tecnología**, Concepción, v. 5, n. 2, p. 145-152, 2003.

VERNOIS, M. **Heat treatment of wood in France**: stat of the art. Paris: Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 2000. 6 p.

WANGAARD, F. F. **The mechanical properties of wood**. London: Chapman & Hall, 1950. 377 p.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment, Indiana*, v. 41, n. 1, p. 1762–1766, 2006.