

Avaliação não-destrutiva de painéis OSB modificados termicamente: parte 1 - efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão

Non-destructive evaluation of thermally modified OSB:
part 1- effect of the thermal treatment on the stress wave velocityCláudio Henrique Soares Del Menezzi¹, Ivan Tomaselli² e Mário Rabelo de Souza³**Resumo**

Painéis de partículas orientadas (OSB) apresentam instabilidade dimensional superior à dos compensados. Para contornar tal limitação vem sendo estudado desde 2001 um método de tratamento térmico para reduzir o inchamento em espessura deste tipo de painel. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar avaliação não-destrutiva e estudar o efeito deste tratamento térmico sobre as propriedades acústicas de painéis OSB. Painéis comerciais de OSB (*Pinus* sp., 640 kg/m³, 12,5mm, três camadas) foram tratados termicamente em prensa laboratorial de acordo com dois níveis de temperatura (190°C e 220°C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos). Cada combinação de temperatura e tempo foi considerada um tratamento, totalizando desta forma seis tratamentos. Foram avaliadas seis repetições por tratamento, num total de 36 painéis. A avaliação não-destrutiva foi feita por meio do método de propagação de ondas de tensão antes do tratamento térmico, após o tratamento e após a climatização final dos painéis, onde foram determinados o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e a velocidade de propagação da onda (v_o). Os resultados demonstraram que o tratamento térmico altera essas propriedades, sendo observado um comportamento antagônico entre o aumento de v_o e a redução de E_d . Temperatura mais elevada e tratamento mais longo implicaram em alterações mais freqüentes. Foi identificado que o tratamento térmico reduz a higroscopicidade e provoca perda de massa o que alterou v_o , enquanto que E_d foi afetado pela perda de massa. Essas alterações indicam que o método de propagação de ondas de tensão poderia ser efetivo na estimativa de propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB tratados termicamente.

Palavras-chave: Ondas de tensão, Avaliação não-destrutiva, Painéis OSB, Tratamento térmico**Abstract**

Oriented strandboard (OSB) has lower dimensional stability than plywood. To overcoming this limitation a kind of thermal treatment has been studied since 2001 which reduce significantly OSB thickness swelling. Thus, this paper series has the objective to study the use of non-destructive evaluation to estimate the properties and the effects of this thermal treatment on the acoustic properties of panels OSB. Commercial OSB (*Pinus* sp., 640 kg/m³, 12,5mm, three layers) were thermally treated in a single-opening laboratorial press according two temperature levels (190°C and 220°C) and three times (12, 16 and 20 minutes). Each temperature-time combination was considered a treatment, totaling six treatments. They were evaluated six replications for each treatment, and a total of 36 panels were evaluated. The non-destructive evaluation was made through the stress wave method before the thermal treatment, after the treatment and after the final conditioning of the panels. They were calculated the dynamic modulus of elasticity (E_d) and the stress wave velocity (v_o). The results showed that the thermal treatment alters those properties and it was observed an antagonistic behavior between the increasing of v_o and the reducing of E_d . Higher temperature and longer treatment more frequent were theses alterations. It was identified that the thermal treatment reduces the panel higroscopicity and impart mass loss which altered v_o , while E_d was affected only by the mass loss. Those alterations indicate the stress wave method could be effective to estimate physical and mechanical properties of this kind of thermally treated OSB.

Keywords: Stress waves, Non-destructive evaluation, OSB panels, Thermal treatment

¹Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília – Campus Darcy Ribeiro – Caixa Postal 04357 – Brasília, DF – 70919-970 – E-mail: cmenezzi@unb.br

²Professor Titular do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná - Rua Lothário Meissner, 632 - Curitiba, PR - 80210-170 – E-mail: itomaselli@stcp.com.br

³Pesquisador do Laboratório de Produtos Florestais do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - SCEN - Trecho 02 - Brasília, DF - 70818-900 – E-mail: mario.souza@ibama.gov.br

INTRODUÇÃO

O painel de partículas orientadas (OSB) é um tipo de composto de madeira utilizado para finalidades estruturais, competindo dessa forma com o compensado. Nos países onde a madeira é tradicionalmente utilizada na construção civil, como Estados Unidos, Canadá, Japão e Europa, o OSB praticamente substituiu o compensado para a utilização como fechamento lateral, recobrimento de pisos e forros. No entanto, o OSB apresenta menor estabilidade dimensional que o compensado, e isto ocorre basicamente em função da necessidade de compressão do material durante o processo de produção, o que implica na incorporação e permanência de elevados níveis de tensão após a consolidação do painel. Desta forma, quando o OSB entra em contato com a umidade, essas tensões de compressão são liberadas, ocasionando inchamento em espessura, cuja intensidade é muito superior à do compensado.

Alguns métodos e procedimentos têm sido estudados para melhorar a estabilidade dimensional de painéis OSB, tais como: tratamento térmico das partículas (PAUL *et al.*, 2006; SEKINO *et al.*, 1998), modificação química das partículas (CABRAL *et al.*, 2006) e aumento do teor de adesivos (IWAKIRI *et al.* 2003). Os estudos demonstram que esses tratamentos são bastante efetivos na melhoria da estabilidade dimensional e que têm em comum o fato de serem aplicados antes da consolidação do painel. Por outro lado, podem apresentar efeitos indesejados, como redução das propriedades de resistência, para os dois primeiros métodos e limitações relativas ao custo, como no aumento do teor de adesivos.

Um método bastante promissor para a melhoria da estabilidade dimensional de painéis OSB vem sendo estudado no Brasil desde 2001 (DEL MENEZZI, 2001). Tal procedimento consiste no tratamento térmico dos painéis já consolidados, à temperatura moderada (<220°C) por curto período de tempo (<30 min) em prensa de pratos com controle de temperatura e pressão. Resultados obtidos por Del Menezzi e Tomaselli (2006) demonstraram que este tipo de tratamento reduz significativamente o inchamento em espessura (-49%), o teor de umidade de equilíbrio (-43%) e a taxa de não-retorno em espessura (-73%) em comparação aos painéis não-tratados. Por outro lado, Del Menezzi (2004) não identificou efeito deletério pronunciado deste método sobre as propriedades me-

cânicas de painéis OSB, e observou que a absorção de água também pode ser reduzida em até 34%. Ademais, o tratamento térmico proposto mostrou-se altamente viável do ponto de vista técnico e econômico (DEL MENEZZI e TOMASELLI, 2007).

A utilização de métodos não-destrutivos (NDT) para a avaliação das propriedades da madeira e de seus subprodutos é bastante difundida, e remonta desde a década de 1960. Os métodos NDT podem ser definidos, segundo Pellerin e Ross (2002), como sendo aqueles que identificam propriedades físicas e mecânicas de materiais sem alterar sua capacidade de uso final, para em seguida usar essa informação na tomada de decisão com relação a uma aplicação apropriada. O grande diferencial dos NDT em relação à caracterização destrutiva é a rapidez na obtenção da informação com um menor volume de trabalho.

Segundo Kang e Booker (2002), o estudo da propagação de ondas para a avaliação de propriedades da madeira tem mais de 30 anos. Vários trabalhos têm demonstrado a existência de uma forte correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico ou da velocidade de propagação da onda no material, com propriedades da madeira, principalmente o módulo de elasticidade estático (TARGA *et al.*, 2005; MINÁ *et al.*, 2004; PELLERIN e ROSS, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2002; AYARKWA *et al.*, 2001). Alguns estudos foram conduzidos para investigar esta relação para materiais compostos, podendo-se citar: painéis de partículas orientadas (ROSS *et al.*, 2003); compostos madeira-plástico (NZOKOU *et al.*, 2006), compostos de fibro-cimento (TEIXEIRA e MOSLEMI, 2002), aglomerados de bagaço (VUN *et al.*, 2004), aglomerados (CASTELLANOS, 2003) e compensados (HAN *et al.*, 2006). De um modo geral, os estudos têm demonstrado que métodos NDT baseados nesse princípio podem ser adequadamente utilizados para a predição de propriedades de materiais compostos. Entretanto, Nzokou *et al.* (2006) concluíram que o método de propagação de ondas de tensão por meio da vibração pode não ser apropriado para a avaliação NDT de compostos madeira-plástico, uma vez que não foi observada correlação significativa entre o módulo de elasticidade dinâmico e o estático. Ademais, segundo Han *et al.* (2006), a existência de espaços vazios e descontinuidades em materiais compostos como OSB podem influir na propagação da onda, dissipando-a e aumentando o tempo da propagação.

Bucur (1995) revisando os diversos fatores que influenciam a velocidade de propagação de ondas na madeira e subprodutos destaca que o teor de umidade, a temperatura e a degradação têm grande influência. Por outro lado, afirma que estudos sobre o efeito do tratamento térmico (retificação ou higrotérmico) sobre essa característica ainda são muito escassos, e apresenta apenas dois estudos feitos (Petit *et al.*, 1991; Böhnke, 1989) cujos resultados apontam que a retificação térmica promove uma redução da velocidade de propagação no sentido longitudinal de madeiras de folhosas, enquanto que para coníferas o efeito é inverso.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico sobre a propagação de ondas de tensão em painéis de partículas orientadas, estudando as possíveis alterações observadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os painéis de partículas orientadas (OSB) foram fornecidos pela empresa Masisa S.A., localizada no município de Ponta Grossa, PR. Foram obtidas 36 amostras de 50 x 50cm (l x c) e espessura nominal de 1,25cm, oriundas de painéis comerciais (244 x 122cm). Segundo informações do fabricante os painéis apresentavam as seguintes características: madeira de *Pinus* sp., densidade nominal 640kg/m³, 19,04kg sólidos de adesivo/m³, sendo 60% de resina fenólica (camadas externas) e 40% de resina à base de isocianato (camada interna), 230g de parafina/m³ de parafina e 40ml de inseticida/m³ de inseticida. As amostras recebidas foram condicionadas em câmara climática (20°C; 65%) até atingirem peso constante. O teor de umidade (TU) médio dos painéis antes do tratamento foi de 9,2%. Os painéis foram tratados termicamente em prensa laboratorial de abertura única, segundo duas temperaturas (190 e 220°C) e três tempos (12, 16 e 20min). Cada combinação de temperatura e tempo foi considerada um tratamento, assim identificados: T1, 190°C/12min; T2, 190/16; T3, 190/20; T4, 220/12; T5, 220/16; e T6, 220/20. Foram avaliados seis painéis por tratamento. Maiores detalhes sobre o tratamento térmico podem ser obtidos em Del Menezzi (2004).

Após o tratamento térmico, os painéis foram repesados para determinação da perda de massa após o tratamento (PMAT), medidos e colocados em sala de climatização para resfriamento e condicionamento. Após o período de climatiza-

ção, os painéis foram novamente pesados e medidos para a determinação da perda definitiva de massa (PDMAT) e da densidade dos painéis após o tratamento (DAT). Foi feita a avaliação não-destrutiva (NDT) dos painéis no eixo paralelo (//) e no eixo perpendicular (⊥) por meio da técnica de propagação de ondas de tensão, utilizando o equipamento Metriguard 239A Stress Wave Timer em três períodos distintos: antes do tratamento, um dia após o tratamento térmico e após climatização, que durou aproximadamente 45 dias. O equipamento mede o tempo de passagem da onda entre a fonte geradora da tensão (pêndulo) e a fonte receptora da onda. De posse do tempo, da densidade do painel e da distância percorrida calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico com base nas equações 1 e 2 fornecidas pelo equipamento, e ajustadas para o sistema internacional (SI) de medidas:

$$E_d = \frac{v^2 \times D}{g} \times 10^{-5} \quad (\text{eq. 1})$$

$$v_o = \frac{L}{t \times 10^{-6}} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, MPa;

v_o = velocidade de propagação da onda, m/s;

L = distância percorrida pela onda, m;

t = tempo de trânsito da onda, μ s;

D = densidade do painel, kg/m³;

g = aceleração da gravidade, 9,804 m/s²

Para avaliar o efeito do tratamento térmico sobre E_d e v_o dos painéis foi utilizado o Teste t-pareado. Neste tipo de análise são comparados os valores observados numa mesma amostra, ou seja, a amostra é controle de si mesma. Desta forma foram comparados os dados obtidos nas três ocasiões, sendo assim três pares de comparação: antes do tratamento e após tratamento (A-T); antes do tratamento e após climatização (A-C); e após tratamento e após climatização (T-C). Consideraram-se significativas as diferenças ao nível de $\alpha=0,05$ de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito do tratamento térmico

As médias e os desvios observados para os valores de E_d e v_o são apresentados na Figura 1. Observa-se que os desvios para ambas as propriedades foram relativamente baixos, principalmente no eixo paralelo (//). Desta forma, os coeficientes de variação ficaram na faixa de 2%

(v_o , eixo // T1) a 5% (E_d , eixo perpendicular T6), o que pode ser considerado muito baixo para este tipo de avaliação. Os valores observados para a velocidade de propagação no eixo paralelo antes do tratamento ($\pm 2850\text{m/s}$) foram próximos aos observados por Han *et al.* (2006) para painéis OSB de mesma densidade ($\pm 2800\text{m/s}$), enquanto que para o eixo perpendicular, os valores obtidos foram ligeiramente superiores ($\pm 2600 \times \pm 2300\text{m/s}$).

Foi observado para v_o , embora não muito pronunciadamente, comportamento anisotrópico, entre os eixos, com os valores no eixo perpendicular em média 92% dos valores observados no eixo paralelo para os três períodos de avaliação. Isso ocorre uma vez que na propagação no eixo perpendicular a descontinuidade é maior, o que implica na dissipação da onda e conseqüente redução de sua velocidade. ROSS *et al.* (2003) observaram que o tempo de trânsito da onda é aumentado, isto é v_o diminui, quando painéis OSB são sujeitos à biodeterioração. Os fungos alimentam-se da parede celular da madeira, o que aumenta os vazios e as descontinuidades. Por outro lado, a anisotropia entre os eixos para E_d foi um pouco mais pronunciada, com eixo perpendicular apresentando 86% dos valores do eixo paralelo, em todos os períodos avaliados.

Pode-se observar também que existe a tendência de v_o , medida após o tratamento, ser superior em comparação aos valores observados antes do tratamento e após a climatização. Dife-

rentemente, os valores de E_d , em ambos os eixos, tendem a diminuir com o tratamento, e voltam a aumentar após a climatização conforme pode ser observado na Tabela 1.

Os valores apresentados nesta tabela foram agrupados segundo o tratamento e refletem a diferença existente entre a média observada entre dois períodos, par em par. Diferenças com sinais negativos indicam que, entre um período e outro, houve incremento de v_o ou E_d . Pode-se observar que os tratamentos com temperatura mais baixa (190 °C; T1-T3) tendem a afetar menos frequentemente v_o e E_d , em comparação ao tratamento térmico com temperatura mais elevada (220 °C; T4-T6). O tratamento a 190°C implicou em 17 diferenças (\neq) significativas, enquanto que a 220 °C foram 27. Da mesma forma, quanto maior o tempo do tratamento, mais freqüentes são as diferenças entre as propriedades: 12 minutos (12 \neq significativas); 16 (15) e 20 (17). Fica evidente também que a propriedade v_o (24 \neq) é mais afetada pelo tratamento que E_d (20 \neq) e que essas alterações são mais freqüentes no eixo paralelo (26 \neq), comparativamente ao perpendicular (18 \neq).

Com relação ao período de avaliação pode-se observar que as diferenças significativas são mais freqüentes entre os valores das propriedades antes e após o tratamento (A-T): foram 19, contra 12, para A-C e T-C. Esses resultados indicam que o tratamento térmico alterou o comportamento acústico dos painéis, principalmente a veloci-

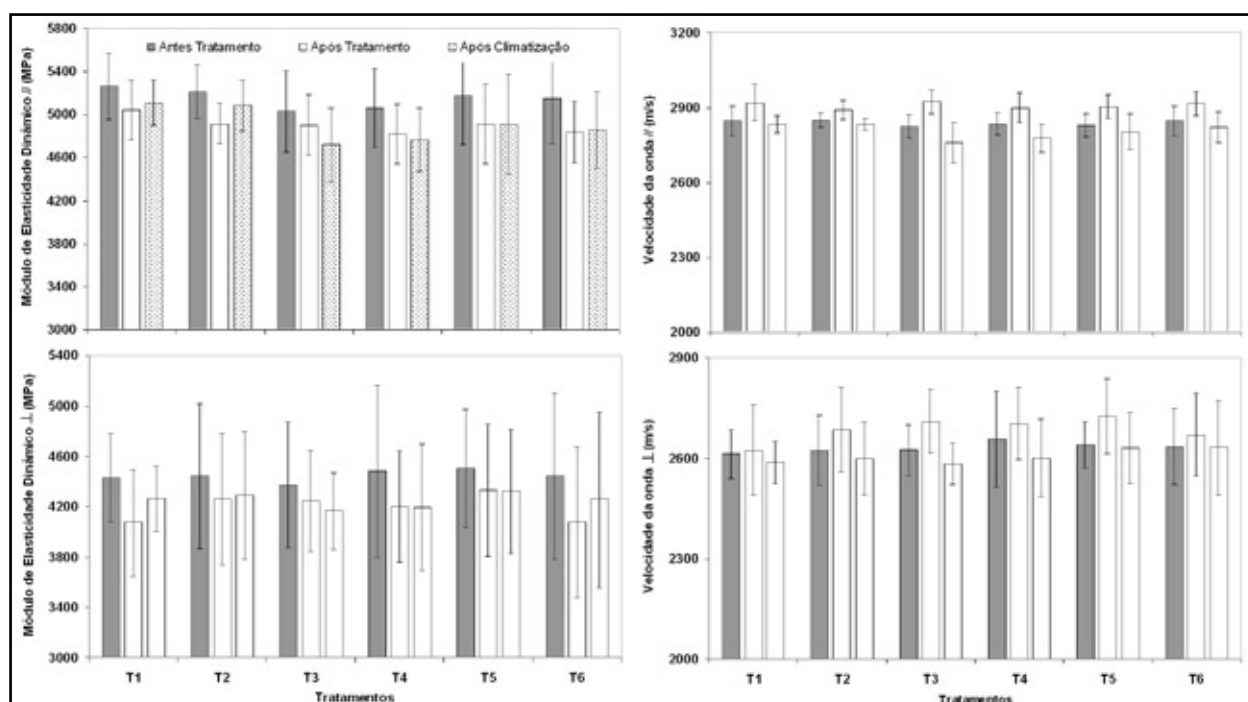


Figura 1. Médias e desvios para o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade de propagação da onda. (T1:190°C/12min.; T2:190/16; T3:190/20; T4:220/12; T5:220/16; T6:220/20)

Figure 1. Means and standard deviation of dynamic modulus of elasticity and wave velocity.

dade de propagação da onda, e que essas alterações foram mais frequentes quanto maior a temperatura e mais longo o tratamento térmico. Observou-se a tendência dos valores de E_d serem menores quanto maior a temperatura e que essa diferença é mais pronunciada no eixo paralelo, comparativamente ao perpendicular. Para v_o , a influência da temperatura tende a ser mais evidente no eixo perpendicular, enquanto que no eixo paralelo os valores são muito próximos.

A Figura 2 apresenta o agrupamento das propriedades avaliadas, independentemente do tempo e da temperatura do tratamento. Assim, observou-se nesse estudo uma tendência de E_d diminuir após a aplicação do tratamento térmico (período A-T) e elevar um pouco após climatização (T-C). No entanto, apenas a diferença entre período A-T foi estatisticamente significativa no eixo perpendicular. Por outro lado, embora a diferença tenha sido relativamente pequena, o

valor de v_o avaliado nos três períodos distintos é estatisticamente diferente em ambos os eixos estruturais. Desta forma, a velocidade de propagação da onda no eixo paralelo foi aumentada de 2838m/s para 2905m/s quando se aplicou o tratamento térmico, e no processo de climatização foi reduzida para 2806m/s, valor muito próximo ao observado antes do tratamento, embora estatisticamente diferente deste. O mesmo comportamento foi identificado no eixo perpendicular, com valores de v_o aumentando de 2633m/s para 2687m/s, e em seguida diminuindo para 2602m/s. Esse comportamento ocorreu a despeito do fato de que os painéis após a climatização tinham teor de umidade inferior ao observado antes do tratamento térmico (Tabela 2), o que implicaria em uma maior velocidade da onda, conforme é amplamente documentado na literatura (HAN *et al.*, 2006; BRASHAW *et al.*, 2004; KANG e BOOKER, 2002; SIMPSON e WANG, 2001).

Tabela 1. Diferenças para as médias do módulo de elasticidade dinâmico (MPa) e da velocidade de propagação da onda (m/s) de acordo com o tratamento.

Table 1. Differences between treatments' means of the dynamic modulus of elasticity (MPa) and the stress wave velocity (m/s).

Propriedade	Pares	Tratamentos					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
$E_d //$	A-T ^a	217,8**	300,3**	ns	244,8**	285,2*	311,9**
	A-C	ns	128,9*	309,7**	295,6**	256,7*	324,6**
	T-C	ns	-171,4*	182,8*	ns	ns	ns
$E_d \perp$	A-T	ns	187,3*	ns	278,3*	171,7**	365,1**
	A-C	ns	ns	ns	283,9*	179,5*	187,1*
	T-C	ns	ns	ns	ns	ns	-170,1*
$v_o //$	A-T	-72,8*	-40,7*	-99,2*	-65,2*	-61,6**	-71,4*
	A-C	ns	ns	65,2*	56,6**	Ns	26,8*
	T-C	ns	57,6**	164,3*	121,7**	100,1**	91,4*
$v_o \perp$	A-T	ns	ns	-85,3**	-46,5*	-84,2**	-36,2*
	A-C	ns	ns	41,4**	56,2*	ns	ns
	T-C	ns	87,9**	126,7**	102,6**	94,7**	ns

a: A-T: diferença antes e após tratamento; A-C: antes tratamento e após climatização; T-C: após tratamento e após climatização; T1: 190°C/12min; T2, 190/16; T3, 190/20; T4, 220/12; T5, 220/16; e T6, 220/20. **, * diferença significativa ao nível de $\alpha=0,01$ e $0,05$; ns: diferença não significativa.

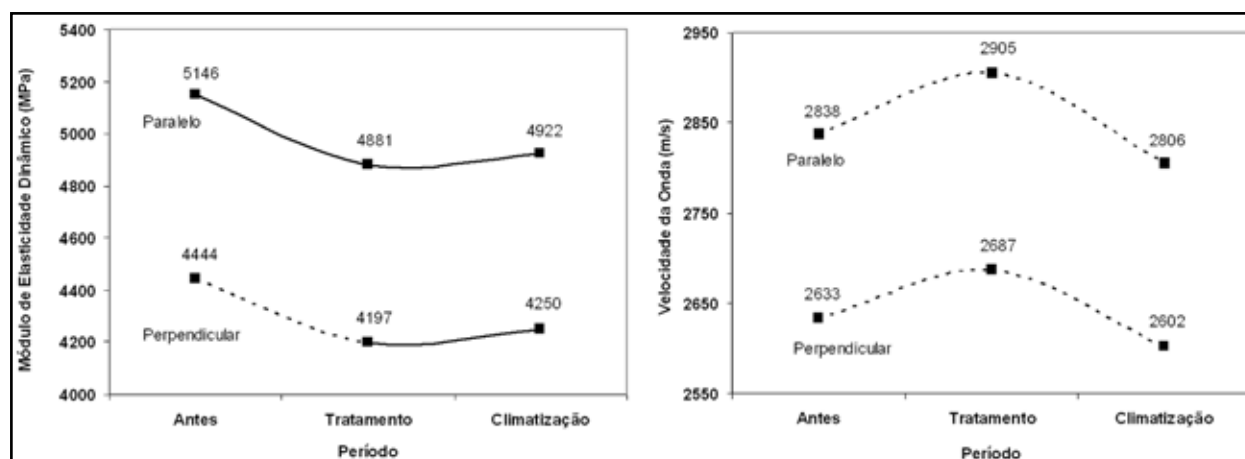


Figura 2. Módulo de elasticidade dinâmico e velocidade de propagação da onda, agrupados de acordo com o período de avaliação (linhas tracejadas: diferença significativa entre os períodos).

Figure 2. Dynamic modulus of elasticity and stress wave velocity according to the phase of evaluation (dash lines: significant means between phases).

Pela equação 1 observa-se que E_d é positivamente influenciado por v_o , entretanto fica evidente, pela análise da Figura 3, um comportamento antagônico entre a v_o e E_d . Supõe-se, desta forma, que o tratamento térmico promoveu modificação da estrutura interna que alterou o comportamento acústico dos painéis tratados, conforme analisa Bucur (1995). Böhnke (1989), citado por este autor, observou o aumento de v_o em madeira de coníferas após a retificação térmica (260°C; 15min). Por outro lado, Petit *et al.* (1991), também citado por Bucur (1995), avaliaram o efeito de um tratamento higrotérmico, chamado V313, sobre as propriedades de painéis estruturais flakeboard. Esse tipo de ensaio procura simular o intemperismo e após seis ciclos a velocidade de propagação da onda foi reduzida em 16% no eixo perpendicular e apenas 5,5% no paralelo. Embora esses estudos apontem conclusões distintas, há concordância de que o tratamento térmico altera as propriedades acústicas da madeira e de painéis de madeira, o que corrobora os resultados aqui obtidos.

A Tabela 2 apresenta os resultados para TUEQ, DAT, PMAT e PDMAT. Pode-se observar que para todos os tratamentos, a PMAT é superior ao TU inicial (9,2%), o que indica que o tratamento térmico promoveu a retirada de toda a umidade presente e também promoveu a degradação de algum polímero da madeira. Observa-se também que PMAT e PDMAT são crescentes a partir do tratamento mais brando (T1-190°C; 12min) até o mais severo (T6-220°C; 20min), enquanto TUEQ é decrescente.

Desta forma, imediatamente após o tratamento térmico os painéis tornaram-se totalmente anidros, e nesta condição as moléculas de água adsorvidas, foram removidas, promovendo a aproximação das microfibrilas. O tratamento térmico também provoca uma reorganização estrutural dos polímeros da madeira, que envolve a redução da região amorfa da celulose (PÉTRISSANS *et al.*, 2003; BHUIYAN *et al.*, 2001) e um entrelaçamento entre lignina e celulose formando uma matriz (KOSIKOVA *et al.*, 1999; TJEERDSMA *et al.*, 1998).

Supõe-se então que estes efeitos promovam uma maior aproximação entre os polímeros da madeira, o que proporcionou o aumento da velocidade de propagação da onda no período A-T conforme pode ser observado na Figura 3. Por outro lado, durante a climatização, os painéis adsorvem a umidade, afastando as microfibrilas, o que reduz a velocidade de propagação, como pode ser observado no período T-C da Figura 2.

Fatores influentes

Como pôde ser visto no item anterior, o tratamento térmico alterou as propriedades acústicas dos painéis OSB. Para avaliar as possíveis causas deste comportamento foram analisadas as alterações físicas ocorridas nos painéis, expressas pela perda de massa após o tratamento (PMAT), após a climatização (PDMAT), e pelo teor de umidade de equilíbrio (TUEQ) as quais foram utilizadas como estimadores da velocidade de propagação da onda. Desta forma, a Figura 3 apresenta o efeito do TUEQ e da PDMAT sobre a velocidade da onda medida após a climatização dos painéis para o seis tratamentos avaliados. Observa-se que o aumento do TUEQ promove a redução da velocidade da onda, enquanto que o aumento da PDMAT tem efeito inverso.

Neste trabalho verificou-se que tratamentos térmicos mais severos tendem a aumentar a v_o uma vez que impõem maior perda de massa e reduzem a higroscopicidade dos painéis. Por outro lado, não foi possível identificar o efeito da PMAT sobre v_o . Os coeficientes β das equações de regressão indicam que para cada aumento de 1% no TUEQ, ocorre redução média de v_o em 0,68%, enquanto que para PDMAT a mesma variação indica aumento em 0,77%. Assim, embora v_o após a climatização tenha sido inferior à observada antes do tratamento, apesar do TUEQ ser inferior do TU, foi evidenciado que após a climatização a variação do TUEQ tem influência sobre v_o , comportamento que era esperado. Analisando-se a Figura 3, evidencia-se que v_o pode ser utilizada como um estimador efetivo para a

Tabela 2. Valores médios de teor de umidade de equilíbrio (TUEQ), densidade (DAT), perda de massa após tratamento (PMAT) e perda de massa após climatização (PDMAT).

Table 2. Means of equilibrium moisture content (TUE), density (DAT), weight loss after treatment (PMAT) and after conditioning (PDMAT).

Variável	Tratamentos					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
TUEQ (%)	7,73	7,17	6,93	6,73	5,93	5,01
DAT (g/cm ³)	0,639	0,636	0,627	0,625	0,629	0,617
PMAT (%)	9,25	9,47	10,10	10,40	10,70	11,90
PDMAT (%)	1,38	1,64	1,90	2,39	3,24	3,87

T1: 190°C/12min; T2, 190/16; T3, 190/20; T4, 220/12; T5, 220/16; e T6, 220/20.

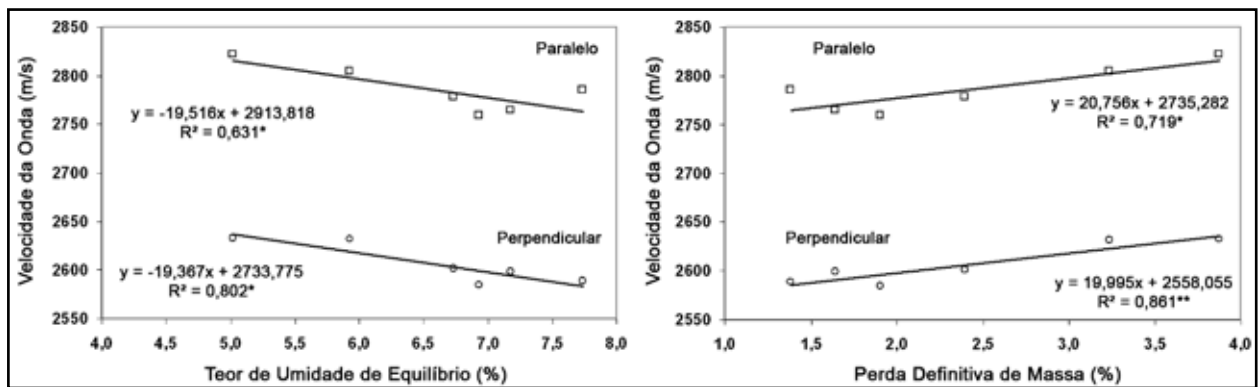


Figura 3. Efeito do teor de umidade de equilíbrio e da perda definitiva de massa após o tratamento térmico, sobre a velocidade de propagação da onda em painéis OSB tratados termicamente. (*, ** significativo ao nível de $\alpha=0,05$ e $0,01$)

Figure 3. Effect of equilibrium moisture content and permanent mass loss on the stress wave velocity. (*, ** significant at $\alpha=0.05$ e 0.01)

predição do teor de umidade de equilíbrio. Supõe-se então, que o método de propagação de ondas de tensão, e a conseguinte determinação da velocidade de propagação da onda, também poderiam ser utilizados para a predição de outras propriedades de relações água-madeira para compostos, tais como o inchamento em espessura e a absorção de água.

Han *et al.* (2006) avaliando o comportamento de painéis OSB observaram que numa variação de 22,4% de TU, ocorreu uma redução de 17% da velocidade de propagação, o que gera uma taxa de 0,75% para cada 1% de TU, valor muito próximo ao observado em apenas uma pequena faixa de umidade. Como comentado anteriormente, a redução de v_o com o aumento do TU era um resultado esperado, e bastante observado na literatura. Por outro lado, esperava-se que o aumento da PDMAT, promovesse a redução da v_o , uma vez que indica que a massa presente no painel foi degradada, dando origem a pequenos vazios e fissuras, o que reduziria a velocidade. Era esperado que o efeito fosse o mesmo daquele observado quando a madeira é atacada por fungos xilófagos. No entanto, o resultado foi o contrário. Bucur (1995) cita que Bönhke e Guyonet (1991) observaram um ligeiro acréscimo da velocidade da onda com o aumento da perda de massa provocado pelo tra-

tamento térmico em atmosfera com nitrogênio. Esse aumento ocorre até certo ponto, 11-12% de perda de massa, sendo observado após isto uma ligeira redução da velocidade de propagação.

Para o módulo de elasticidade dinâmico foi identificado que as alterações relativas à perda de massa têm influência sobre os valores observados, não sendo afetado pelo TUEQ. Os modelos gerados são apresentados na Tabela 3. Observou-se que todos os modelos foram altamente significativos e que a estimativa de E_d pode ser feita utilizando-se a velocidade de propagação da onda e a perda de massa provocada pelo tratamento térmico.

No entanto, esta estimativa é mais precisa no eixo perpendicular que no eixo paralelo dos painéis tratados. Por outro lado, os coeficientes de perda de massa apresentaram sinal negativo, indicando que houve um impacto deletério sobre o módulo de elasticidade dinâmico. Este fato pode ajudar explicar a redução do E_d , a despeito do aumento da v_o , comportamento este observado nos painéis após o tratamento térmico. Desta forma, especula-se que uma vez que o módulo de elasticidade dinâmico seja sensível às alterações de massa, esta variável possa ser utilizada para a predição de propriedades também sensíveis à perda de massa, como aquelas relativas à resistência e rigidez de compostos.

Tabela 3. Modelos de regressão para estimativa do módulo de elasticidade dinâmico em ambos os eixos do painel.
Table 3. Regression models to predict the dynamic modulus of elasticity for both structural axis of the panel.

Eixo	Período	Coeficientes**				R ²	EPR
		CTE	v_o	PMAT	PDMAT		
Paralelo	Tratamento	-4691,8	3,67	-106,58	ns	0,598**	167,1
	Climatização	-9216,5	5,04	ns	ns	0,786**	156,2
Perpendicular	Tratamento	-5527,3	3,97	93,09	ns	0,942**	114,3
	Climatização	-6,955	4,38	ns	-73,77	0,956**	99,8

** , significativo ao nível $\alpha=0,01$; CTE: constante; v_o = velocidade de propagação da onda no eixo considerado; PMAT, PDMAT: perda de massa após o tratamento e após a climatização, respectivamente.

CONCLUSÕES

Foi observado neste estudo que o tratamento térmico alterou as propriedades acústicas de painéis de partículas orientadas (OSB). Diferentemente do esperado, verificou-se um comportamento antagônico entre o aumento da velocidade de propagação da onda (v_o) e a redução do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) após o tratamento térmico e um comportamento inverso após a climatização dos painéis. Temperaturas mais elevadas e tratamentos mais longos implicaram em alterações mais frequentes tanto da v_o , quanto do E_d . Foi identificado que o tratamento térmico reduz a higroscopicidade e impõe perda de massa aos painéis o que alterou a v_o , enquanto que o E_d foi influenciado apenas pelas variáveis relativas à perda de massa. Essas alterações indicam que o método não-destrutivo de propagação de ondas de tensão pode ser efetivo para a estimativa de propriedades de painéis OSB tratados termicamente, principalmente daquelas que envolvem relações água-madeira (físicas) e aquelas que relacionadas à massa (mecânicas). Estas análises serão abordadas futuramente.

AGRADECIMENTOS

Ao autores agradem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor, e aos funcionários e estudantes do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR) que contribuíram para a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYARKWA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y. Predicting modulus of rupture of solid wood and finger-jointed tropical african hardwoods using longitudinal vibration. *Forest Products Journal, Madison*, v.51, n.1, p.85-92, 2001.

BHUIYAN, M.T.R; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of intermittent heat treatment on cristallinity in wood cellulose. *Journal of Wood Science, New York*, v.47, n.5, p.336-416, 2001.

BRASHAW, B.K.; WANG, X.; ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. Relationship between stress wave velocity of green and dry veneer. *Forest Products Journal, Madison*, v.54, n.6, p.85-89, 2004.

BUCUR, V. *Acoustics of wood*. New York: CRC, 1995. 284p.

CABRAL, C.P.T.; VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M.; PIMENTA, A.S.; SOARES, C.P.B.; CARVALHO, A.M.M.L. Propriedades de chapa tipo OSB fabricadas com partículas acetiladas de madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* e *Pinus elliottii*. *Revista Árvore, Viçosa*, v.30, n.4, p.659-668, 2006.

CASTELLANOS, J.R.S. Caracterización mecánica de madera reconstituída: modulo de elasticidad de tableros de partículas de madera evaluado con metodos no destructivos. *Maderas. Ciencia y Tecnología, Concepcion*, v.5, n.1, p.20-43, 2003.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 2004. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Retificação térmica de painéis de partículas orientadas: efeito sobre a estabilidade dimensional**. 2001. 29p. Monografia (Conclusão de Disciplina de Pós-graduação) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001.

DEL MENEZZI, C.H.S.; TOMASELLI, I. Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: a preliminary study. *Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin*, v.64, n.3, p.212-217, 2006.

DEL MENEZZI, C.H.S.; TOMASELLI, I. Technological and economic feasibility to produce OSB with enhanced properties in Brazil. In: INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 1, 2007, Cardiff. **Proceedings**. Cardiff: BioComposites Centre, 2007. p.35-45.

HAN, G.; WU, Q.; WANG, X. Stress-wave velocity of wood-based panels: effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal, Madison*, v.56, n.1, p.28-33, 2006.

- IWAKIRI, S.; MENDES, L.M.; SALDANHA, L.K. Produção de chapas de partículas orientadas OSB de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resina, parafina e composição de chapa. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.13, n.1, p.89-94, 2003.
- KANG, H.; BOOKER, R.E. Variation of stress wave velocity with MC and temperature. **Wood Science and Technology**, New York, v.36, n.1, p.41-54, 2002.
- KOSIKOVA, B.; HRICOVINI, M.; COSENTINO, C. Interaction of lignin and polysaccharides in beech wood (*Fagus sylvatica*) during drying processes. **Wood Science and Technology**, New York, v.33, n.5, p.373-380, 1999.
- MINÁ, A.J.S.; OLIVEIRA, F.G.R.; CALIL JR., C.; DIAS, A.A.; SALES, A. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.188-196, 2004.
- NZOKOU, P.; FREED, J.; KAMDEM, D.P. Relationship between non destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, n.1, p.90-93, 2006.
- OLIVEIRA, F.G.R.; CAMPOS, J.A.O.; SALES, A. Ultrasonics measurement in Brazilian hardwoods. **Materials Research**, São Carlos, v.5, n.1, p.51-55, 2002.
- PELLERIN, R.F.; ROSS, R.J. **Nondestructive evaluation of wood**. Madison: Forest Products Laboratory, 2002. 210p.
- PÉTRISSANS, M.; *et al.* Wettability of heat-treated wood. **Holzforchung**, Berlin, v.57, n.3, p.301-307, 2003.
- ROSS, R.J.; YANG, V.W.; ILLMAN, B.L.; NELSON, W.J. Relationship between stress wave transmission time and bending strength of deteriorated oriented strandboard. **Forest Products Journal**, Madison, v.53, n.3, p.33-35, 2003.
- SEKINO, N. *et al.* The bond quality of steam pre-treated particles. In: EUROPEAN PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 2, Llandudno, 1998. **Proceedings**. Llandudno, 1998. p.30-38.
- SIMPSON, W.T.; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**, Madison, v.51, n.10, p.51-54, 2001.
- TARGA, L.A.; BALLARIN, A.W.; BIAGGIONI, M.A.M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.25, n.2, p.291-299, 2005.
- TEIXEIRA, D.E.; MOSLEMI, A. Assessing modulus of elasticity of wood-fiber cement (WFC) sheets using nondestructive evaluation (NDE). **Bioresource Technology**, Essex, v.79, n.2, p.193-198, 2002.
- TJEERDSMA, B.F. *et al.* Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v.56, n.3, p.149-153, 1998.
- VUN, R.Y.; WU, Q.; MONLEZUN, C.J. Through-thickness ultrasonic characterization of wood and agricultural fibre composites. **Forest Products Journal**, Madison, v.54, n.12, p.233-239, 2004.

Recebido em 13/02/2007

Aceito para publicação em 27/11/2007