Ciência Florestal, Santa Maria, v.9, n.1, p. 161-171
ISSN 0103-9954

EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA NAS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* Engelm

EFFECT OF THE SPECIFIC GRAVITY ON STATIC BENDING PROPERTIES IN PLYWOOD OF *Pinus elliottii* Engelm

Hernando Alfonso Lara Palma[1]

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a determinação de relações entre propriedades de resistência e rigidez à flexão estática e a massa específica de painéis compensados de 5 lâminas feitos de madeira de *Pinus elliottii* Engelm, provenientes de plantios de 30 anos de idade. Foram estudadas varias relações lineares simples, múltipla e polinomiais, envolvendo o módulo de ruptura (MOR), o módulo de elasticidade (MOE), a tensão no limite proporcional (TLP) e a massa específica (Me) dos compensados. A massa específica mostrou não ser um indicador muito preciso das propriedades de resistência e rigidez dos painéis. As propriedades dos compensados à flexão estática, em termos de MOE, MOR e TLP mostraram baixos coeficientes de correlação e determinação ajustados por regressão linear simples, indicando pouca dependência da massa específica. O módulo de ruptura à flexão nas direções principais (x e y), teve uma forte dependência do módulo de elasticidade e da tensão no limite proporcional. Os coeficientes de correlação dos melhores modelos de regressão nas duas direções variaram de 0,85 a 0,91. Histogramas de freqüências da massa específica dos compensados mostraram uma distribuição unimodal homogênea, enquanto que o MOE e o MOR apresentaram uma distribuição unimodal com assimetria positiva.

Palavras-chave: Compensados, lâminas, flexão estática em compensados, *Pinus elliottii*.

ABSTRACT

The objetive of this work was to determine the relation between the rigidity and strength properties in static bending and specific gravity of plywood manufactured from five veneer of *Pinus elliottii* Engelm, plantation from a 30 year-old. Linear simples, multiple and polynomial relations involving the modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), stress at proportional limit (TLP) and specific gravity (Me) of the plywood were studied. The specific gravity did not prove to be a very exact indicator of the rigidity and strength properties of the plywood. The MOE, MOR and TLP in static bending of the plywood showed low coefficients of correlations and determination adjusted for simple linear regression, indicating a little dependence of the specific gravity. The modulus of rupture in static bending on the principal directions (x and y) had a strong dependence of the modulus of elasticity and stress at proporcional limit. The coefficients of correlations of the

1. Engenheiro em Indústrias da Madeira, Dr., Professor do Departamento de Ciências Florestais. Faculdade de Ciências Agrárias. Universidade Estadual Paulista. CEP: 18603-970. Botucatu. SP.

best models of regression in the two directions varied from 0,85 to 0,91. The frequency histograms of the specific gravity of plywood showed an unimodal homogeneous distribution, while the MOE and MOR showed an unimodal distribution with positive asymmetric skewness.

Key words: Plywood, veneer, static bending in plywood, *Pinus elliottii*.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades de rigidez e de resistência da madeira compensada é indispensável para diversas soluções construtivas, a fim de permitir uma avaliação da capacidade destas estruturas no seu limite máximo.

Com o aumento das restrições ambientais e do distanciamento das reservas naturais das espécies tradicionais, utilizadas na manufatura de compensados no país, o abastecimento passou a ser prejudicado. Para contornar este problema, uma das opções foi a utilização de madeira (lâminas) de reflorestamentos, principalmente da espécie do gênero *Pinus*.

Do ponto de vista tecnológico, a maioria dos produtos laminados de madeira refletem de certa maneira as propriedades das espécies das quais foram manufaturados. Portanto, faz-se necessário quantificar como mudanças que possam ocorrer nas propriedades dessa nova matéria-prima podem afetar as propriedades físicas e mecânicas dos compensados.

REVISÃO DE LITERATURA

A madeira é um produto orgânico sendo usada, principalmente, em seu estado natural, constituindo-se de camadas concêntricas de crescimento. Esta é produzida por árvores que crescem sobre condições ecológicas variáveis, que naturalmente, afetam suas taxas de crescimento, forma , estrutura e resistência, variações estas que tornam difícil atribuir valores de esforços de trabalho com o mesmo grau de precisão que outros materiais.

As diferenças no arranjo dos tecidos, dimensões e espessura da parede do lúmen celular determinam valores próprios da massa específica para cada espécie de madeira. Salienta-se que a resistência da madeira está estreitamente relacionada com a sua massa específica.

Segundo LUTZ (1971), as propriedades físicas e mecânicas da madeira de maior interesse para a produção de lâminas para compensados, são : a massa específica, permeabilidade, contração, módulo de elasticidade longitudinal, módulo de ruptura, cisalhamento longitudinal e perpendicular às fibras, tração perpendicular e dureza.

A influência de tratos silviculturais aplicados intensamente em reflorestamentos, como por exemplo, podas e ciclos menores de rotação afetam a qualidade da madeira (BUNN,1981). Assim, mudanças em variáveis, tais como massa específica, tamanho e distribuição de nós e largura dos anéis de crescimento é esperada, portanto, as propriedades das lâminas obtidas desta matéria-prima

dependem destas mudanças.

De acordo com BIER (1983b), é essencial determinar como estas mudanças, em particular, a massa específica e o tamanho de nós, podem afetar as propriedades mecânicas em compensados de *Pinus*, e assim predizer adequadamente o seu desempenho estrutural. Algumas mudanças na magnitude destas propriedades afetam diretamente às tensões básicas de trabalho.

LUTZ (1964), observou a necessidade de se considerar a grande variação existente entre os lenhos tardio e inicial de coníferas na qualidade das lâminas destinadas à confecção de compensados.

A resistência final de um painel compensado depende fortemente da distribuição dos lenhos tardios e inicial nas lâminas. As propriedades físicas e mecânicas nos dois tipos de lenho, em madeira de *Pinus* de rápido crescimento, são variáveis, sendo que a massa específica, segundo diversos autores, varia em torno de 0,30 g/cm^3 para o lenho inicial e 0,65 a 0,90 g/cm^3 para o lenho tardio, com uma diferença em resistência de 3 a 5 vezes maior neste último (LUTZ, 1964; CAMARGO, 1987; MUÑIZ, 1993 e KOCH, 1965).

Em geral, árvores de rápido crescimento de espécies do gênero *Pinus*, apresentam os primeiros anéis de crescimento a partir da medula bastante largos e a faixa de lenho tardio estreita, e os anéis mais próximos da casca mais estreitos e uma maior percentagem de lenho tardio. A largura média dos anéis de crescimento na madeira de *Pinus* de rápido crescimento pode variar de 3 a 8 mm. aproximadamente e de 50 a 70% a proporção do lenho inicial no anel (MUÑIZ, 1993).

Isto é relevante do ponto de vista da laminação, quando considerarmos que o corte da madeira é feito principalmente, na direção tangencial da tora e em parte na direção radial, devido à conicidade que apresentam as árvores, obtendo-se assim lâminas com distribuição de ambos os lenhos através da espessura. Portanto, ao laminar-se madeiras de coníferas de rápido crescimento em espessuras mais finas , corre-se o risco de se obter lâminas com grande influência de lenho inicial, o que implicaria em uma menor resistência do painel. Este fato é menos importante em lâminas produzidas de madeiras de crescimento lento (nativas), onde esta distribuição fica diminuída, pela pequena largura dos anéis de crescimento.

Segundo LUTZ (1964), a grande diferença nas propriedades nos dois lenhos de crescimento, é uma característica importante na confecção de compensados para uso estrutural, pois, o lenho tardio distribuído nas lâminas fornece uma maior resistência ao painel.

De acordo com o autor acima, a maioria das lâminas obtidas de madeira que têm anéis de crescimento estreitos possuem uma boa distribuição de lenho tardio, e consequentemente melhor resistência. Ao contrário, nas madeiras que possuem anéis de crescimento largos, é necessário que o lenho tardio represente no mínimo 50 % do anel anual, para se obter lâminas com propriedades semelhantes as anteriores. Por outro lado, lâminas produzidas com ao menos dois anéis de crescimento ou mais através da espessura, reduzem durante o processo de corte (desenrolamento) a profundidade das fendas de laminação e a separação do lenho inicial produzida pela faca e pela flexão contrária das lâminas na saída do torno, o que implica a produção de lâminas com baixas propriedades de flexão.

BIER (1983a), apresentou um estudo sobre as relações entre as propriedades de resistência e rigidez à flexão do compensado de *Pinus radiada*, com variáveis tais como: taxa de nós das lâminas, massa específica das lâminas e massa específica do painel. Os resultados mostraram pouca dependência entre o módulo de ruptura com a massa específica do painel ao contrário do módulo de elasticidade. A resistência mostrou-se fortemente influenciada pela taxa de nós, e a massa específica do compensado apresentou pouca correlação com a massa específica das lâminas componentes. O conhecimento desta relação é importante para manter a construção balanceada (BODIG & JAYNE, 1993).

BIER (1984) , apresentou em um outro estudo, a influência da massa específica nas propriedades de rigidez e de resistência de compensados estruturais de *Pinus*. Os resultados obtidos, mostraram que apesar da grande dispersão nos dados, evidenciou-se sempre um aumento nas propriedades de rigidez e de resistência à flexão paralela às fibras com o aumento da massa específica do painel.

Outro resultado relevante do estudo acima, foi que para uma distribuição de freqüências da massa específica quase homogênea do compensado, existe, sempre uma distribuição muito irregular nas freqüências das propriedades de rigidez e resistência do painel. Segundo este autor , as razões deste comportamento podem ser atribuídos à grande diferença de massa específicas entre as lâminas componentes do painel e também às características da última lâmina submetida à tensão, que governa a resistência à flexão no corpo de prova, e que no caso de possuir uma maior percentagem de lenho inicial, resultará em baixa resistência do compensado para uma massa específica aparentemente alta.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostragem, coleta de material e estudo das propriedades físicas e mecânicas dos compensados

A madeira utilizada neste trabalho foi obtida de árvores de *Pinus elliottii* Engelm, provenientes de plantios de 30 anos de idade, localizados na Floresta Nacional de Iratí, Paraná.

A amostragem das árvores foi seletiva, escolhendo-se entre as de maior diâmetro e com fuste cilíndrico.

Após a seleção foram obtidas quatro árvores e de cada árvore foram coletados dois toretes de 1,20 m de comprimento, tomados nos primeiros oito metros, perfazendo um total de oito toretes para o estudo.

De cada torete foram feitos dez compensados de 5 lâminas de 2 mm cada, com dimensões nominais de 600 x 600 x 10 mm, perfazendo 20 compensados em cada árvore e um total de 80 para a espécie.

As variáveis do processo de fabricação dos painéis foram escolhidas levando-se em consideração as recomendações do fabricante do adesivo fenol-formaldeído utilizado. Assim, as

variáveis foram fixas para todos os painéis como segue : temperatura de prensagem 130^0C, pressão de prensagem 9 kg/cm^2, 360 g/m^2 de adesivo por linha dupla de colagem e 6% de teor de umidade das lâminas.

Na avaliação dos painéis, as determinações principais foram a resistência à flexão estática paralela e perpendicular à grã da face e a massa específica aparente. Os corpos de prova foram confeccionados segundo as prescrições das normas recomendadas pela DIN–52371 para compensados.

Para o teste de flexão estática foram retirados de cada chapa dez corpos de prova, cinco para flexão paralela e cinco para flexão perpendicular às fibras, perfazendo um total de 800 amostras testadas. Para o cálculo da massa específica foi retirada uma amostra perto da região da fratura do corpo de prova de flexão, perfazendo também um total de 800 amostras para a espécie.

Todos os ensaios foram feitos com as amostras tendo um teor de umidade de aproximadamente 12%, 20% ± 2^0 C e 65 ± 2% de UR.

Análise estatística

Com o objetivo de estabelecer relações entre as propriedades estudadas nos compensados, foram feitas análises de regressão, utilizando os seguintes modelos de equações para o ajuste de curvas: modelo linear simples ($y = b_0 + b_1 x$), modelo linear com duas variáveis ($y = b_0 + b_1 x_1 + b_2x_2$) e modelo polinomial de 2^0 grau ($y = b_0 + b_1x + b_2x^2$).

Foram testadas, como variáveis dependentes, o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR) e a tensão no limite proporcional (TLP) do compensado, e como variáveis independentes o MOE, o MOR a TLP e a massa específica aparente (Me).

O ajuste e a precisão das equações foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R^2), correlação (r) e o erro padrão de estimativa (s_{yx}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações apresentadas na Tabela 1, foram as de melhor ajuste para estimar os parâmetros elásticos e de resistência dos compensados, no sentido paralelo e perpendicular.

As tentativas para se obter um valor mais elevado de R^2, com a introdução em cada modelo de pelo menos mais um termo linear ou ao quadrado não foi muito significativo, como pode ser evidenciado nas equações 7 a 12 e 19 a 22.

Observando-se o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa (s_{xy}), constatam-se que as equações que melhor se ajustaram aos dados para o MOR, são as originadas do modelo 3, 4, 10 e 12, para o MOE as equações 7 e 8 e para a TLP as equações 6 e 11, no caso dos compensados no sentido paralelo. Para os resultados obtidos no sentido perpendicular às fibras, os modelos que melhor se ajustaram aos dados seguiram a mesma tendência apresentada no sentido paralelo, ao igual que os valores de R^2.

TABELA 1: Equações de regressão das propriedades de flexão estática dos compensados.

Eq. Nº	Modelos e coeficientes	r	R^2	syx	syx (%)	F
a) Para testes paralelos à grã da face [1]						
(1)	MOE = 212560 Me - 8640	0,57	0,33	21408	31,61	197,59**
(2)	MOR = 1546 Me - 279	0,65	0,42	130	21,78	1041,10**
(3)	MOR = 0,0055 MOE + 223	0,85	0,72	89	14,91	283,16**
(4)	MOR = 1,16 TLP + 101	0,91	0,82	72	12,06	1800,70**
(5)	TLP = 1150 Me - 226	0,62	0,38	104	24,41	245,09**
(6)	TLP = 0,0046 MOE + 112	0,92	0,84	52	12,21	2138,00**
(7)	MOE = 126 MOR + 17426 Me - 17515	0,85	0,72	13757	20,31	522,62**
(8)	MOE = 24749 + 14 MOR + 0,09 MOR^2	0,86	0,74	13408	19,80	560,71**
(9)	MOE = 77180 - 245134 Me + 396791 Me^2	0,58	0,34	21293	31,44	102,53**
(10)	MOR = 556 Me + 0,0047 MOE - 33	0,87	0,76	84	14,07	626,23**
(11)	TLP = 247 Me + 0,0043 MOE - 1,8	0,92	0,85	51	11,97	1168,40**
(12)	MOR = 333 Me + 1,05TLP - 41	0,91	0,83	70	11,73	975,70**
b) Para testes perpendiculares à grã da face [1]						
(13)	MOE = 60135 Me - 11669	0,58	0,34	5945	27,06	173,08**
(14)	MOR = 766 Me - 130	0,64	0,41	65	21,76	238,51**
(15)	MOR = 0,01 MOE + 76	0,88	0,77	40	13,39	1169,80**
(16)	MOR = 1,30 TLP + 64	0,89	0,80	38	12,72	1370,90**
(17)	TLP = 0,007 MOE + 28	0,87	0,76	28	15,52	1100,40**
(18)	TLP = 506 Me - 102	0,62	0,38	46	25,50	207,80**
(19)	MOE = 2769 Me + 75 MOR - 1948	0,88	0,77	3470	15,59	584,61**
(20)	MOR = 236 Me + 0,009 MOE -27	0,89	0,80	38	12,72	680,65**
(21)	TLP = 134 Me + 0,006 MOE - 30	0,88	0,78	27	14,97	606,69**
(22)	MOR = 175 Me + 1,17 TLP - 10	0,90	0,81	36	12,05	744,45**

[1] o número de amostras testadas (N) foi de 400; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade.

As Figuras 1 e 2 apresentam para os modelos 1, 2, 5, 3, 4 e 6, respectivamente, os gráficos das equações ajustadas, bem como as tendências dos valores ajustados, para os compensados no sentido paralelo.

Com relação ao comportamento dos dados nas equações 1, 2 e 5, observa-se que a massa específica não é um indicador muito preciso do MOE, do MOR e da TLP, comportamento semelhante também no sentido perpendicular. De uma maneira geral, apesar da dispersão dos valores, nota-se que um aumento na massa específica do compensado implica em um aumento do MOE, MOR e TLP.

Com relação ao comportamento dos dados das equações 3, 4, 15 e 16, observa-se que o módulo de ruptura nas duas direções principais está bem correlacionado com o módulo de

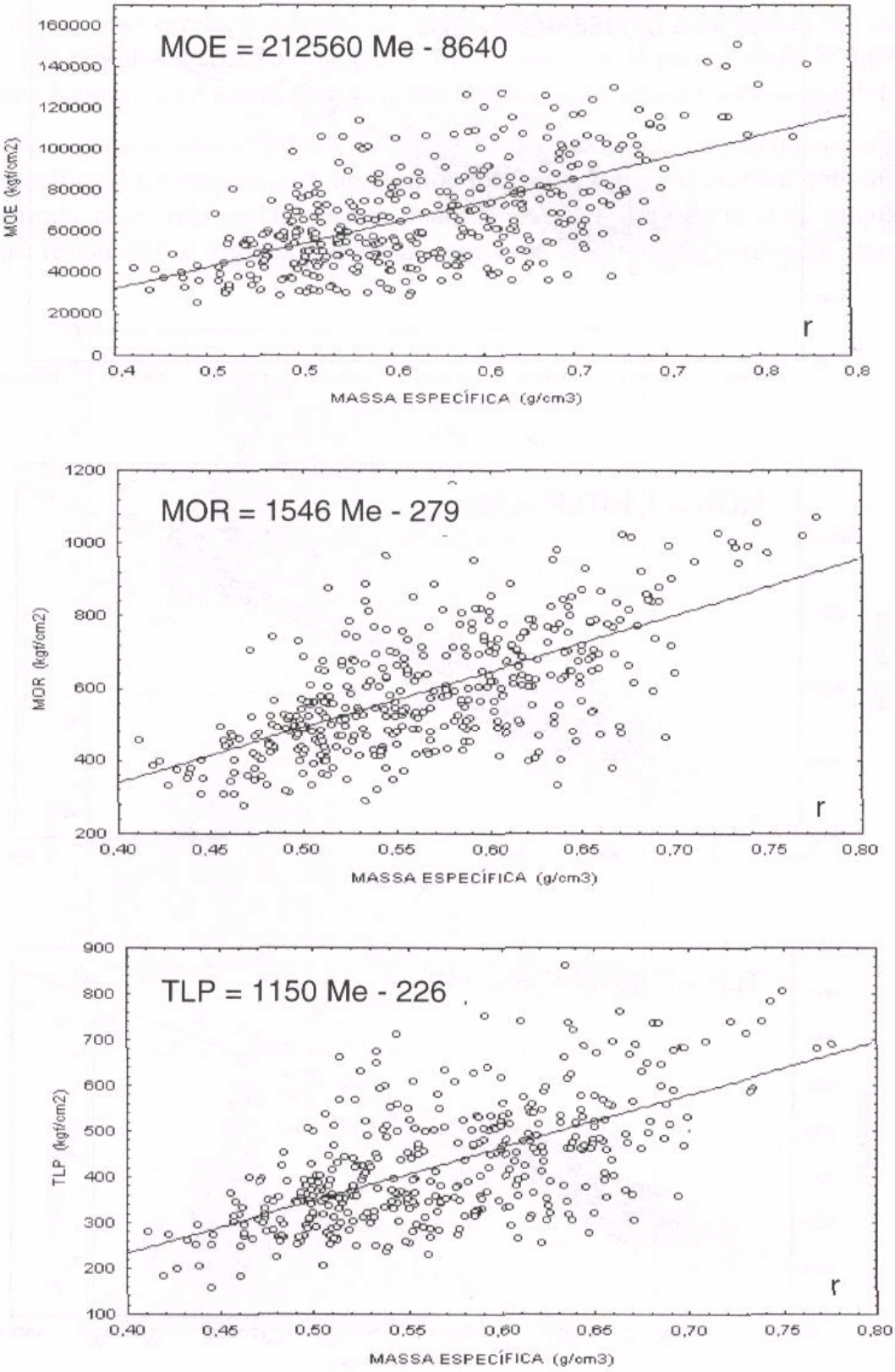

FIGURA 1: Representação gráfica das equações de regressão simples, ajustadas para o MOE, o MOR, a TLP e a massa específica.

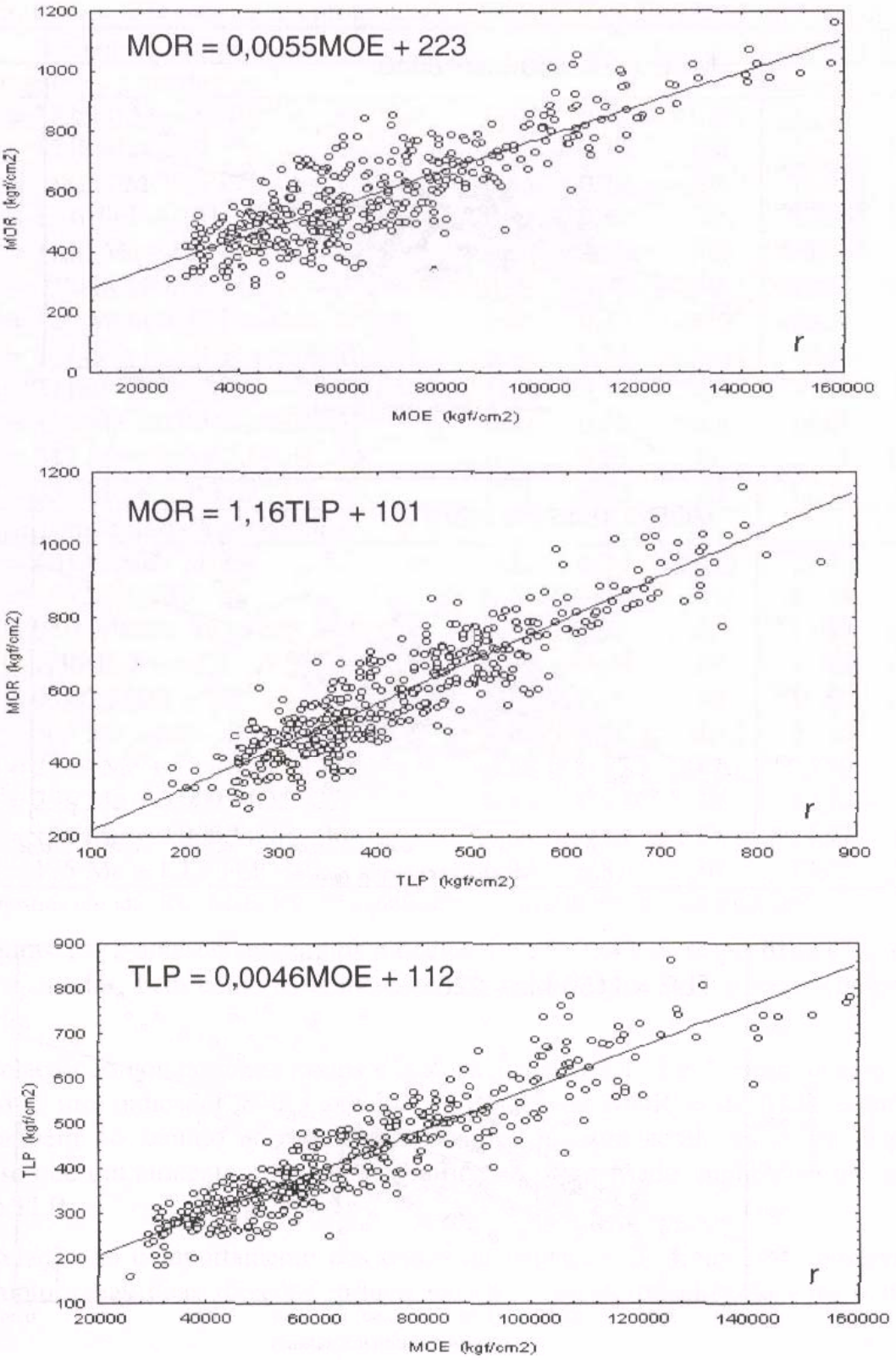

FIGURA 2: Representação gráfica das equações de regressão simples, ajustadas para o MOE e o MOR, o MOR e a TLP e a TLP e o MOE para compensados no sentido paralelo.

elasticidade e a tensão no limite proporcional, melhorando muito pouco com a inclusão da massa específica. Com base nas correlações obtidas das regressões lineares, observaram-se coeficientes de correlação nos dois sentidos de 0,85 a 0,88 para o MOE, 0,85 a 0,91 para o MOR e 0,87 a 0,92 para a TLP. Na Figura 2, observa-se as tendências destes valores ajustados no sentido paralelo.

Além disso, pode-se observar, nos histogramas de distribuição de freqüências da Figura 3, que a massa específica dos compensados apresentou uma distribuição unimodal com uma tendência nas classes centrais mais retangular para a maioria dos valores observados, enquanto que as propriedades de resistência e rigidez apresentaram uma distribuição unimodal com assimetria positiva.

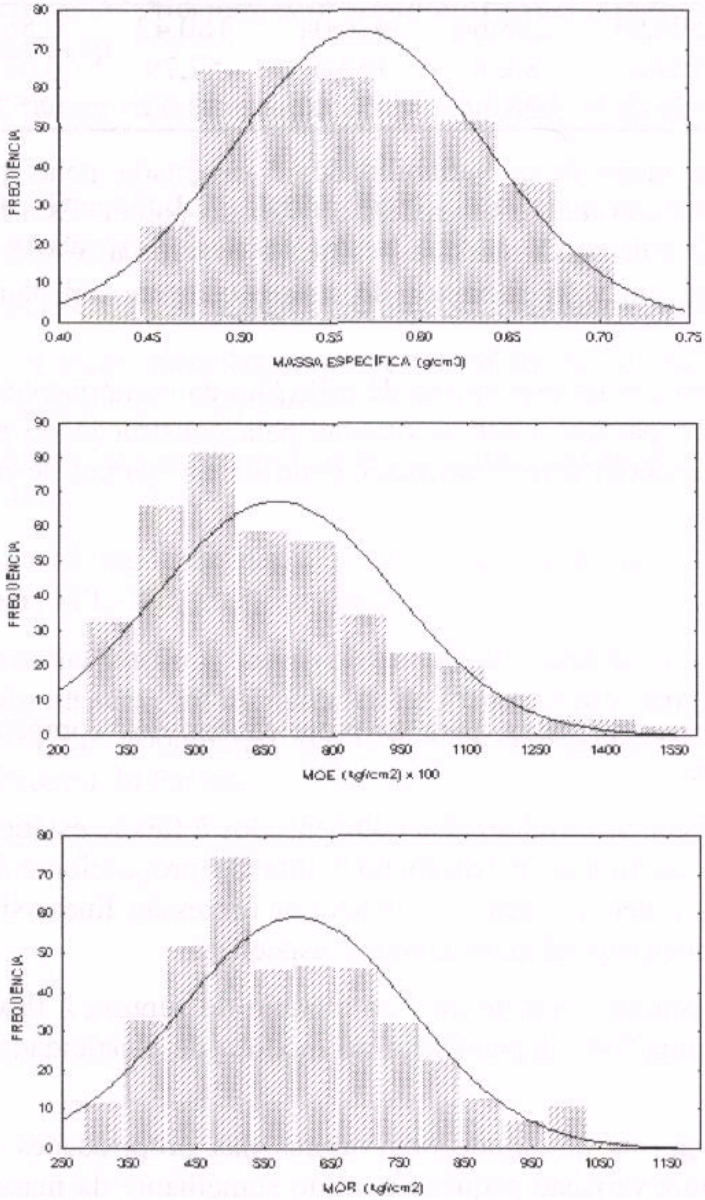

FIGURA 3: Histogramas de distribuição de freqüências da massa específica, MOE e MOR dos compensados no sentido paralelo.

Relacionando estes gráficos (Figura 3) com os coeficientes de variação (Tabela 2), observa-se que a variação da massa específica é muito menor que o MOR e MOE, portanto, para valores próximos ou semelhantes de massas específicas dos painéis, existem valores de resistência e rigidez com amplitudes muito grandes.

TABELA 2: Resultados médios de flexão estática e massa específica dos compensados.

ESTAT.	MOE (kgf/cm^2)		MOR (kgf/cm^2)		TLP (kgf/cm^2)		MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3)	
	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
Media	67729,64	21970,38	596,93	298,66	426,04	180,42	0,567	0,559
s	26155,43	7289,29	169,89	83,97	132,07	57,79	0,071	0,070
C.V.	38,60	33,18	28,46	28,12	31,00	32,03	12,52	12,52

Segundo BIER (1984), a razão desta variabilidade, é originada pelas propriedades de resistência da lâmina mais externa sob tensão e paralela ao vão do painel. Esta lâmina pode ser inteiramente de lenho inicial, que é de baixa massa específica e governa a resistência à flexão do corpo de prova, resultando assim, em valores baixos de resistência para um painel de uma alta massa específica aparente.

Cabe ressaltar, que as propriedades específicas de cada lâmina componente do compensado não são mensuráveis facilmente e passam a ser absorvidas pela construção do painel, portanto, lâminas de alta ou baixa massa específica poderão fazer parte de um painel de massa específica constante.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, para as propriedades dos compensados de *Pinus elliottii* Engelm, pode-se concluir:

1. As propriedades de resistência e rigidez dos compensados à flexão estática, em termos de módulo de elasticidade, módulo de ruptura e tensão no limite de proporcionalidade, mostraram baixos coeficientes de correlação e determinação ajustados por regressão linear simples (nos dois sentidos principais), indicando pouca dependência da massa específica.

2. A resistência dos compensados, em termos de módulo de ruptura à flexão estática, nos dois sentidos testados, mostrou uma forte dependência do módulo de elasticidade e da tensão no limite de proporcionalidade.

3. Existe uma alta variação na amplitude dos valores das propriedades de resistência e rigidez dos compensados, para uma variação pequena e muito semelhante da massa específica dos painéis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIER, H. Radiata pine plywood - A theorical prediction of the bending properties of structural plywood. **New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, n.54**, 1983a.

BIER, H. Radiata pine plywood - An experimental study of the bending properties of structural plywood. **New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, n.53**, 1983b.

BIER, H. Radiata pine plywood - The strength properties of small clear specimens of plywood. **New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, n.83**, 1984.

BODIG, J. ; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 711p.

BUNN, E.H. The nature of the resource. **New Zealand of Forestry Science**, v.26, n.2, p.162-199, 1981.

CAMARGO, F.A. **Densidade e lenho tardio de árvores provenientes de desbastes em povoamentos de *Pinus***. Relatório técnico CAFMA. Piracicaba, 1987.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN. **Prufung von holz. Din 52192**. Berlin, 1979.

KOCH, P. Effects of seven variables on properties of southern pine plywood: part I. **For. Prod. J.**, Madison, v.15, n.9, p.355 - 361, 1965.

LUTZ, J. How growth rate affects properties of softwood veneer. **For. Prod. J.**, Madison, v.14, n.3, p.97-102, 1964

LUTZ, J. Wood and log characteristics affecting veneer production. USDA. **Forest Service Research Paper**, FPL-150, Madison, 1971.

MUÑIZ, G.I. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. *e Pinus taeda* L.** Curitiba, 1993, 236p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.