

# Determinação de propriedades elásticas e de resistência em compensados de *Pinus elliottii*

## *Determination of elastic and strength properties in plywood of Pinus elliottii*

Hernando Alfonso Lara Palma

---

**ABSTRACT:** The objective of this work was to estimate the rigidity and strength properties of plywood manufactured of *Pinus elliottii* Engelm with veneer and wood strength properties. The results of theoretic calculations of modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) of plywood in the parallel and perpendicular directions had a strong equivalence with the values observed through conventional tests. The best estimated value to the MOE parallel was 7,6% higher than the value observed and 0,4% lesser than perpendicular MOE. MOR was 0,5% lesser on parallel direction and 5% lesser on perpendicular direction. The theoretic estimate mechanical properties of plywood on parallel directions, considering only the parallel veneer of span, was of 1,2% and 18% lesser on MOE parallel and perpendicular in relation to the value obtained using all transversal section and 1,4% and 9,8% lesser in the case of MOR.

**KEYWORDS:** Plywood, Strength, Panels, *Pinus elliottii*, Modulus of Elasticity, Modulus of Rupture.

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo estimar as propriedades de resistência e de rigidez de compensados de *Pinus elliottii* Engelm, a partir das propriedades de resistência tanto da madeira sólida como lâminas. Os resultados dos cálculos teóricos do módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR) dos compensados nas direções paralela e perpendicular, tiveram uma forte equivalência aos valores observados através de ensaios convencionais. O melhor valor estimado para o MOE no sentido paralelo foi 7,6% maior que o valor observado, e de 0,4% menor para o MOE no sentido perpendicular. Para o MOR foi de 0,5% menor no sentido paralelo e de 5% menor no sentido perpendicular. As propriedades mecânicas dos compensados no sentido paralelo estimadas teoricamente, considerando atuantes somente as lâminas sob tensão paralelas ao vão, foram de 1,2% e 18% menor para MOE paralelo e perpendicular em relação ao calculado considerando toda a seção, e de 1,4% e 9,8% menor no caso do MOR.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compensado, Resistência, Painéis, *Pinus elliottii*, Módulo de Elasticidade, Módulo de Ruptura.

---



## INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades elásticas e de resistência dos compensados é indispensável para diversas soluções construtivas tais como: placas, cascas, almas de vigas em I, painéis de pisos, móveis e divisórias, a fim de permitir uma avaliação da capacidade destas estruturas no estado limite último.

Atualmente, no Brasil existem poucas pesquisas ou dados sobre a qualidade da madeira de *Pinus* e sua influência nas propriedades de produtos compensados, sendo este um fator limitante ao uso do material em projetos de responsabilidade. Para o *Pinus*, em particular, as investigações já existentes concentram-se, principalmente, no setor de papel e celulose e são de pouca aplicabilidade na indústria de compensados.

## REVISÃO DE LITERATURA

Do ponto de vista da aplicação estrutural dos painéis, a determinação das propriedades elásticas e de resistência do compensado são investigadas profundamente no exterior. Para fazê-lo, diversas técnicas ou métodos experimentais são utilizados para examinar estas propriedades.

Segundo Booth (1990) e Burdzik & Van Rensburg (1991), os trabalhos feitos neste sentido têm basicamente dois objetivos: o primeiro é a determinação das propriedades elásticas experimentalmente por diversos métodos de ensaio, e o segundo é a formulação de equações para predição e avaliação destes parâmetros, a partir das propriedades correspondentes das lâminas individuais.

De acordo com March (1944); Bodig & Goodman (1973); McLain & Bodig (1974);

Bodig & Jayne (1982) e Booth (1990), para efeito de análise, o compensado pode ser considerado como um material ortotrópico, ou seja, com simetria elástica em relação a três planos mutuamente perpendiculares e caracterizado por propriedades direcionais.

A utilização do compensado em soluções estruturais práticas implica frequentemente na utilização da lei de Hooke no estado plano de tensões, ou seja, a aproximação bi-dimensional da teoria de elasticidade ortotrópica referida a uns dos planos principais do sistema coordenado.

Segundo March (1944), a análise das propriedades elásticas do compensado baseia-se no conhecimento das constantes elásticas de cada lâmina isolada. Este autor foi um dos primeiros a apresentar os fundamentos do tratamento matemático dos materiais ortotrópicos e sua extensão à madeira e ao compensado, com o objetivo de equacionar o comportamento dos parâmetros elásticos.

Assim, o módulo de elasticidade efetivo para uma placa de compensado balanceado, submetido à ação de forças no seu plano, pode ser expresso por:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n (E_x)_i \cdot I_i \quad ;$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n (E_y)_i \cdot I_i$$

onde,

$\bar{E}_x$  ;  $\bar{E}_y$  = módulo de elasticidade efetivo do compensado paralelo e perpendicular à grã submetido à flexão

$(E_x)_i$  ;  $(E_y)_i$  = módulo de elasticidade da *i*-ésima lâmina na direção paralela (x) e perpendicular (y) à grã



$I$  = momento de inércia de toda a seção transversal, em relação ao eixo neutro da seção

$I_i$  = momento de inércia da seção transversal da  $i$ -ésima lâmina em relação ao eixo neutro do compensado.

Segundo Freas (1964), Gurfinkel (1973) e o Forest Products Laboratory (1987), quando todas as lâminas que compõem o painel compensado são da mesma espessura e mesma espécie de madeira, as equações acima reduzem-se a:

onde;

$E_L$  = módulo de elasticidade das lâminas ou madeira na direção longitudinal

$E_T$  = módulo de elasticidade das lâminas ou madeira na direção tangencial.

$n$  = número de lâminas que compõem o compensado.

Além das equações teóricas apresentadas acima para o cálculo dos módulos de elasticidade, vários autores apresentaram também expressões para o cálculo das propriedades de resistência (módulo de ruptura e tensão no limite proporcional) do compensado submetido à flexão a partir da análise teórica de March (1944).

Assim, a resistência máxima à flexão num compensado pode ser calculada a partir da expressão  $F_{al} = (\bar{E}_x / E_L) \cdot F_M$  para a resistência na direção paralela à grã e  $F_{at} = (\bar{E}_y / E_L) \cdot F_M$  para o sentido perpendicular à grã, onde  $F_M$  equivale ao módulo de ruptura da madeira na direção longitudinal (Howard & Hansen, 1962; Freas, 1964;

Gurfinkel, 1973; Curry & Hearmon, 1974 e Forest Products Laboratory, 1987).

A maioria dos pesquisadores citados acima sustentaram, que uma forma de cálculo aproximada dos módulos de elasticidade e de ruptura, na qual o erro seja mínimo, consiste em considerar como atuantes apenas as lâminas com fibras paralelas à direção, em relação à qual está se calculando o valor de  $\bar{E}_x$ ;  $\bar{E}_y$ ,  $F_{al}$  e  $F_{at}$ , exceto no caso de compensados de três lâminas.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Espécie estudada*

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

### *Amostragem e coleta do material*

A amostragem das árvores foi seletiva, escolhendo-se aquelas com fuste cilíndrico, reto, sem bifurcações ou defeitos, para evitar-se a excessiva presença de lenho de compressão e os defeitos que pudessem inviabilizar a obtenção de corpos de provas e lâminas ou influir nos resultados.

Após a seleção, foram obtidas 3 árvores e de cada árvore foram coletados quatro toretes de 1,20 m de comprimento, tomados nos primeiros oito metros, conforme apresentado na Figura 1.

O sistema de amostragem utilizado foi eleito no sentido de se obter uma menor variabilidade longitudinal entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira sólida e as lâminas para fabricação de compensados.



Figura 1

Esquema da retirada do material para o estudo.

*Outline of the withdrawal of material for study.*

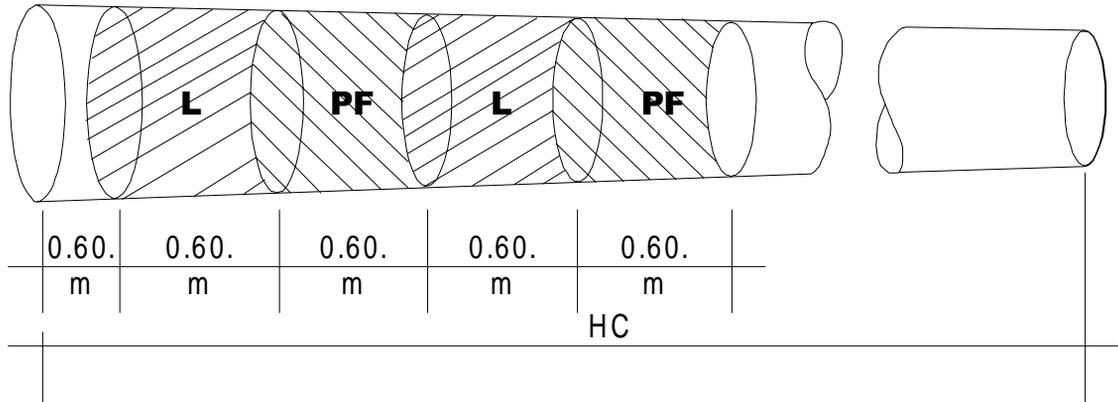
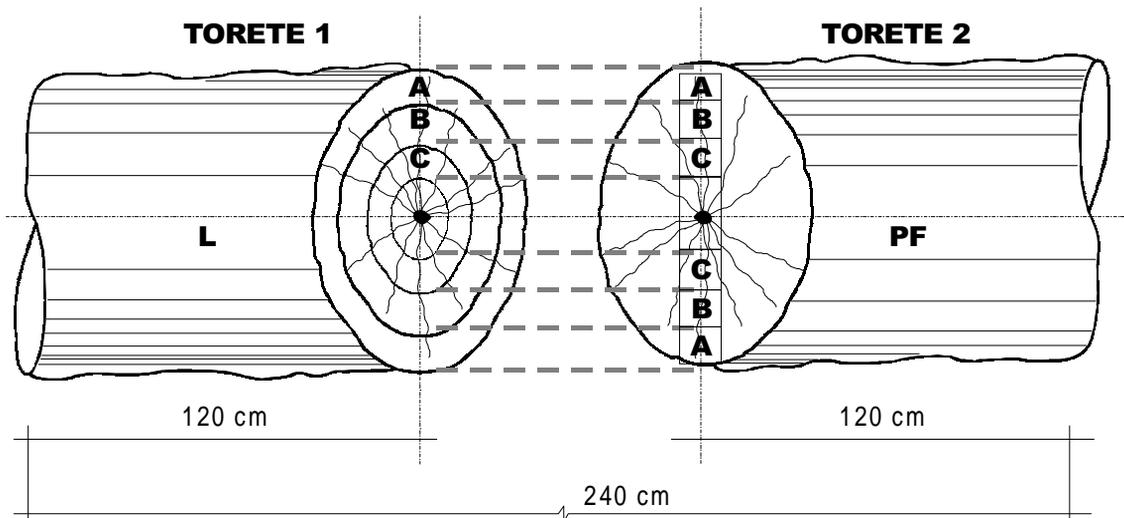


Figura 2

Esquema da correspondência entre as propriedades da madeira e as lâminas.

*Outline of the correspondence between wood properties and veneer.*



Os toretes destinados à laminação, foram marcados nos topos em três posições ou coroas circulares no sentido medula-casca, correspondente à mesma espessura e

posição, dos vigotes retirados do torete contíguo para o estudo das propriedades físicas e mecânicas da madeira, como indicado na Figura 2.



### *Estudo das propriedades físicas e mecânicas*

- Madeira sólida

As propriedades da madeira de *Pinus* estudadas no sentido medula-casca, foram flexão estática, compressão paralela e perpendicular à grã e massa específica aparente.

As amostras foram confeccionadas segundo as prescrições das normas recomendadas pela ASTM D-143 para madeira sólida. Os corpos de prova foram retirados dos vigotes de forma sistemática, das três posições (A, B e C) no sentido medula-casca, de 5 cm de espessura e equivalente à mesma posição da região da tora contígua destinada a laminação, como mostrado na Figura 2.

- Compensados e lâminas

De cada torete foram feitos cinco compensados de cada grupo (A, B e C) de lâminas, perfazendo 30 em cada árvore e um total de 90 para a espécie.

Os compensados foram feitos de 5 lâminas de 2 mm cada, com dimensões nominais de 600 mm x 600 mm x 10 mm.

As variáveis do processo de fabricação dos painéis foram escolhidas levando-se em consideração as recomendações do fabricante do adesivo fenol-formol utilizado no processo.

Na avaliação dos painéis, as determinações principais foram a resistência à flexão estática longitudinal e transversal. Os corpos de prova foram confeccionados segundo as prescrições das normas recomendadas pelo DIN-52371 para compensados.

Para o teste de flexão estática foram retirados de cada chapa 10 corpos de prova, cinco para flexão paralela e cinco para flexão perpendicular às fibras, perfazendo um total de 900 amostras testadas.

Visando uma análise mais ampla, foram feitos ensaios de flexão estática em corpos

de prova confeccionados a partir de lâminas de madeira retirados de duas lâminas selecionadas ao acaso de um grupo de sete classificadas para a confecção de um compensado.

Das duas lâminas selecionadas foram feitos 40 corpos de prova, dos quais tomaram-se cinco ao acaso para o ensaio de flexão, perfazendo um total de 25 amostras em cada posição em estudo (A, B ou C) por torete, e um total de 450 para a espécie.

Todos os ensaios mecânicos foram feitos com as amostras tendo um teor de umidade de aproximadamente 12%, após acondicionamento em ambiente controlado a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 2\%$  de UR.

### *Cálculo teórico das propriedades mecânicas dos compensados.*

- Módulo de elasticidade

Foram determinados os valores dos módulos de elasticidade teóricas  $\bar{E}_x$ ;  $\bar{E}_y$  dos compensados com base na equação geral que, para o caso particular de compensados composto de 5 lâminas da mesma espessura e espécie obtidos por corte rotatório, fica determinado pela seguinte expressão:

sendo;

$$r = E_T / E_L$$

Para o cálculo teórico do módulo de elasticidade do compensado, considerando apenas as lâminas com fibras paralelas ao vão a equação acima neste caso particular fica expressa por:



$$\bar{E}_{xp} = 99/125 E_L \quad e \quad \bar{E}_{yp} = 26/125 \cdot E_L$$

Para uma análise mais ampla no cálculo teórico do módulo de elasticidade, foram determinados os módulos de elasticidade longitudinal ( $E_L$ ) e tangencial ( $E_T$ ) da madeira, considerando:

- a)  $E_{Lc}$  obtido através de ensaios de compressão paralela à grã da madeira sem defeitos  
 $E_{Tc}$  obtido através de ensaios de compressão perpendicular à grã na direção tangencial da madeira sem defeitos
- b)  $E_{Lf}$  obtido através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos  
 $E_{Tc}$  obtido através de ensaios de compressão perpendicular à grã na direção tangencial
- c)  $E_{Lf}$  Obtido através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos  
 $E_T E_{Lf} / 35$  relação recomendada por Bodig & Jayne (1982) para lâminas de coníferas obtidas por desenrolamento
- d)  $E_{Lc}$  obtido através de ensaios de compressão paralelas à grã em madeira sem defeitos  
 $E_T E_{Lc} / 35$
- e)  $E_{Lf}$  obtido através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos  
 $E_T$  obtido da relação  $0,045 \cdot E_{Lf}$  (Freas, 1964 e Forest Products Laboratory, 1987)
- f)  $E_{Lc}$  obtido através de ensaios de compressão paralela à grã em madeira sem defeitos  
 $E_T$  obtido da relação  $0,045 E_{Lc}$
- g)  $E_{Lfl}$  obtido através de ensaios de flexão estática em lâminas de madeira  
 $E_{Tc}$  obtido através de ensaios compressão perpendicular à grã na direção tangencial
- h)  $E_{Lfl}$  obtido através de ensaios de flexão estática em lâminas  
 $E_T$  obtido da relação  $0,045 E_{Lfl}$

- Resistência máxima à flexão (módulo de ruptura)

Para o caso do compensado, composto de 5 lâminas da mesma espessura e espécie de madeira e considerando no cálculo toda a seção transversal, o módulo de ruptura paralelo ( $F_{rl}$ ) e perpendicular ( $F_{rt}$ ) às fibras com base nas relações citadas, ficam determinados pelas seguintes equações:

$$F_{rl} = \left[ \frac{26r + 99}{125} \right] \cdot F_M ;$$

$$F_{rt} = \left[ \frac{50r + 26}{75} \right] \cdot F_M$$

O valor de  $r$  utilizado nos cálculos, foi obtido considerando as mesmas relações usadas para o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura ( $F_M$ ) foi obtido dos seguintes testes:

- $F_{Mc}$  obtido através de ensaios de compressão paralela à grã em corpos de prova de madeira sem defeitos.
- $F_{Mf}$  obtido através de ensaios de flexão estática em corpos de prova de madeira sem defeitos.
- $F_{Mfl}$  obtido através de ensaios de flexão estática em lâminas de madeira.

Foi calculado também o módulo de ruptura à flexão, considerando-se somente as lâminas com fibras paralelas ao vão. Assim, com base nas equações acima, o módulo de ruptura fica determinado pelas seguintes expressões:

$$F_{rlp} = (99/125) F_M ; \quad F_{rtp} = (26/75) F_M$$

#### Análise estatística

A equivalência entre as propriedades elásticas e de resistência dos compensados, determinadas através de ensaios convencionais e equações teóricas de predição, foi analisada através do delineamento experi-



mental casualizado. Foram consideradas as propriedades de resistência e de elasticidade como tratamentos e 18 repetições (3 árvores, 2 toretes por árvore e 3 posições em relação ao diâmetro) em cada tratamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Módulo de elasticidade*

As Tabelas 1 e 2, apresentam os resultados obtidos nos ensaios convencionais de

flexão estática e compressão na madeira sólida e lâminas, e os resultados de flexão dos compensados.

A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade teórico dos compensados, considerando no cálculo toda a seção transversal.

Cada resultado representa a média de 18 repetições, a partir de oito equações teóricas (tratamentos) geradas das relações de  $r$  e  $E_L$ .

A análise de variância, mostrou, que houve diferença entre os módulos de elasticidade, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 1

Módulos de elasticidade e de ruptura da madeira sólida e lâminas obtidos no teste de flexão estática e compressão e relações entre o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_L$ ) e tangencial ( $E_T$ ) em MPa.

*Moduli of elasticity and rupture of solid wood and veneer obtained from the test of static bending and compression and relations between modulus of longitudinal elasticity ( $E_L$ ) and tangencial ( $E_T$ ), in Mpa.*

Repetição	MADEIRA SÓLIDA				LÂMINAS			MÓD. DE RUPTURA				
	Compressão		Flexão Estática		Flexão Estática		Flexão Estática		Compr. paral. mad.	Flexão estát. mad.	Flexão estát. mad.	
	Paralela	Perpendicular										
	$E_{LC}$	$E_T$	$\frac{E_T}{0,045 E_{LC}}$	$\frac{E_T}{E_{LC}/35}$	$E_{Ll}$	$\frac{E_T}{0,045 E_{Ll}}$	$\frac{E_T}{E_{Ll}/35}$	$E_{Ll}$	$\frac{E_T}{0,045 E_{Ll}}$	$F_{Mc}$	$F_{Mf}$	$F_{Mfl}$
E1A	11706,1	563,5	526,8	334,5	11073,0	498,3	316,4	5364,0	241,4	45,5	85,0	77,0
E1B	5962,0	564,7	268,3	170,3	8012,5	360,6	228,9	3471,5	156,2	32,4	53,9	57,7
E1C	3621,4	368,3	163,0	103,5	6216,7	279,7	177,6	2139,4	96,3	24,9	40,3	38,4
E2A	10007,1	345,3	450,3	285,9	10647,3	479,1	304,2	5188,8	233,5	38,3	73,4	73,7
E2B	5340,1	385,9	240,3	152,6	7231,8	325,4	206,6	3446,0	155,1	23,0	48,3	50,3
E2C	3509,5	368,3	157,9	100,3	5821,6	262,0	166,3	3728,4	167,8	29,0	46,7	52,7
E3A	14832,7	498,9	667,5	423,8	15080,2	678,6	430,9	9145,2	411,5	46,6	89,0	104,0
E3B	10451,0	361,3	470,3	298,6	8601,1	387,0	245,7	7862,0	353,8	35,4	57,9	86,8
E3C	3321,3	340,4	149,5	94,9	8975,6	403,9	256,4	5714,3	257,1	19,2	57,8	69,5
E4A	13624,8	566,1	613,1	389,3	12688,6	571,0	362,5	8401,6	378,1	30,5	87,4	92,9
E4B	7432,9	545,3	334,5	212,4	7175,6	322,9	205,0	6087,8	274,0	29,0	49,1	71,6
E4C	6707,3	383,2	301,8	191,6	8526,8	383,7	243,6	4002,1	180,1	29,7	54,1	61,3
E5A	11607,6	348,8	522,3	331,6	12422,9	559,0	354,9	4993,2	224,7	39,3	74,9	71,5
E5B	10756,1	472,6	484,0	307,3	9206,7	414,3	263,0	4402,2	198,1	32,7	62,6	66,0
E5C	6716,6	495,3	302,2	191,9	9054,2	407,4	258,7	5401,0	243,0	30,5	60,7	77,9
E6A	10688,8	622,6	481,0	305,4	14920,9	671,4	426,3	6529,0	293,8	39,2	77,9	80,6
E6B	9954,5	352,9	448,0	284,4	10527,5	473,7	300,8	5969,0	268,6	32,2	72,9	73,6
E6C	9100,4	579,5	409,5	260,0	10531,2	473,9	300,9	4839,3	217,8	34,0	66,1	61,7
Média	8630,0	453,5	388,4	246,6	9817,4	441,8	280,5	5371,4	241,7	32,9	64,3	70,4



Tabela 2

Valores médios do MOE e MOR na flexão estática, paralela e perpendicular às fibras dos compensados (em MPa).

*Average values of MOE and MOR of plywood in bending parallel and perpendicular to the grain (MPa).*

Repetição	MÓDULO DE ELASTICIDADE MOE		MÓDULO DE RUPTURA MOR	
	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
	ExT	EyT	Frl	Frt
E1A	5248,9	1944,5	61,4	31,2
E1B	3940,7	1479,2	51,2	22,6
E1C	3120,7	1105,0	38,8	17,4
E2A	6445,6	2089,2	61,6	30,3
E2B	4980,1	1653,5	49,8	26,5
E2C	3589,3	1341,1	38,9	20,7
E3A	11204,5	3466,3	88,2	42,4
E3B	8509,8	2765,1	68,5	34,9
E3C	5771,0	1896,8	49,6	25,4
E4A	8686,7	3089,5	68,5	38,3
E4B	6353,5	2030,4	50,4	27,4
E4C	5792,8	2105,1	46,7	24,5
E5A	6799,4	2601,6	57,5	34,0
E5B	7622,5	2169,3	68,7	32,4
E5C	4686,9	1743,1	51,5	24,8
E6A	9175,6	2485,2	71,3	31,8
E6B	7222,9	2163,8	53,8	26,5
E6C	6059,2	1876,9	46,8	24,2
Média	6400,6	2154,2	56,9	28,6
S	2095,7	753,7	12,6	6,3
CV	32,7	35,0	22,2	22,2

Na comparação entre as médias dos módulos de elasticidade observados no sentido paralelo ( $E_{xT} = \bar{E}_x$ ) e perpendicular ( $E_{yT} = \bar{E}_y$ ) e as médias dos módulos de elasticidade teóricos calculados, foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5%, que a análise de variância, não mostrou significância estatística, com exceção, dos valores obtidos das relações (g) e (h).

Observa-se, também, que os resultados médios para os módulos de elasticidade nos dois sentidos, obtidos das equações (a), (d) e

(f) onde utilizou-se as propriedades de compressão da madeira ( $E_{Tc}$  e  $E_{Lc}$ ), e as equações (b), (c) e (e) que utilizaram as propriedades de flexão da madeira ( $E_{Ll}$ ) são equivalentes.

Das equações teóricas que melhor estimaram o módulo de elasticidade das chapas, destacam-se, a equação (d) com uma variação de 7,6% maior em relação ao módulo de elasticidade convencional no sentido paralelo, e a equação (f) com uma variação de 0,4% menor para o sentido perpendicular.



Tabela 3

Módulo de elasticidade teóricos dos compensados considerada toda a seção transversal (em MPa).

*Theoretical moduli of elasticity and rupture of plywood considering all the transversal section (MPa).*

Propriedades		ExT	ExT(a)	ExT(b)	ExT(c)	ExT(d)	ExT(e)	ExT(f)	ExT(g)	ExT(h)
MOE paralelo	Média	6400,6	6929,3	7869,8	7833,8	6886,3	7867,3	6915,8	4348,5	4304,4
	S	2095,7	2750,9	2136,4	2163,6	2763,6	2153,1	2775,4	1439,4	1450,4
	CV	32,7	39,7	27,1	27,4	40,1	27,4	40,1	33,1	33,7
		EyT	EyT(a)	EyT(b)	EyT(c)	EyT(d)	EyT(e)	EyT(f)	EyT(g)	EyT(h)
MOE perpendicular	Média	2111,4	2154,2	2401,2	2264,2	1990,3	2391,9	2102,6	1476,4	1308,7
	S	598,7	753,7	595,5	619,6	798,8	654,6	843,8	405,7	441,0
	CV	28,4	35,0	24,8	27,4	40,1	27,4	40,1	27,5	33,7

$E_{xT}, E_{yT}$  = módulos de elasticidade observados dos compensados no sentido paralelo e perpendicular.

$E_{xT}(a), E_{yT}(a), \dots, E_{xT}(h), E_{yT}(h)$  = módulos de elasticidade teóricos dos compensados paralelo e perpendicular.

(a)  $r = E_T/E_{Lc}$  e  $E_L = E_{Lc}$  (e)  $r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lf})/E_{Lf}$  e  $E_L = E_{Lf}$

(b)  $r = E_T/E_{Lf}$  e  $E_L = E_{Lf}$  (f)  $r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc})/E_{Lc}$  e  $E_L = E_{Lc}$

(c)  $r = (E_T = E_{Lf}/35)/E_{Lf}$  e  $E_L = E_{Lf}$  (g)  $r = E_T/E_{Lfl}$  e  $E_L = E_{Lfl}$

(d)  $r = (E_T = E_{Lc}/35)/E_{Lc}$  e  $E_L = E_{Lc}$  (h)  $r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lfl})/E_{Lfl}$  e  $E_L = E_{Lfl}$

Tabela 4

Módulos de elasticidade e ruptura teóricos dos compensados considerado só as lâminas paralelas ao vão (em MPa).

*Theoretical moduli of elasticity and rupture of plywood considering only the parallel veneer at the span (MPa).*

Propriedade		ExT	Exp (a)	Exp (b)	Exp (g)
MOE paralelo	Média	<b>6400,6</b>	<b>6835,0</b>	<b>7775,4</b>	<b>4254,1</b>
	S	<b>2095,7</b>	<b>2743,0</b>	<b>2127,9</b>	<b>1433,5</b>
	CV	<b>32,7</b>	<b>40,1</b>	<b>27,4</b>	<b>33,7</b>
		Frl	Frlp (a)	Frlp (b)	Frlp (c)
MOR paralelo	Média	<b>56,9</b>	<b>26,0</b>	<b>51,0</b>	<b>55,8</b>
	S	<b>12,6</b>	<b>5,6</b>	<b>11,7</b>	<b>12,5</b>
	CV	<b>22,2</b>	<b>21,7</b>	<b>23,0</b>	<b>22,4</b>
Propriedade		EyT	Eyp (a)	Eyp (b)	Eyp (g)
MOE perpendicular	Média	<b>2111,4</b>	<b>1795,0</b>	<b>2042,0</b>	<b>1117,2</b>
	S	<b>598,7</b>	<b>720,4</b>	<b>558,8</b>	<b>276,5</b>
	CV	<b>28,35</b>	<b>40,13</b>	<b>27,37</b>	<b>33,70</b>
		Frt	FrtP (a)	FrtP (b)	FrtP (c)
MOR perpendicular	Média	<b>28,6</b>	<b>11,4</b>	<b>22,3</b>	<b>24,4</b>
	S	<b>6,3</b>	<b>2,5</b>	<b>5,1</b>	<b>5,5</b>
	CV	<b>22,2</b>	<b>21,7</b>	<b>23,0</b>	<b>22,4</b>

$E_{xT}, E_{yT}, Frl, Frt$  = módulo de elasticidade e ruptura observados dos compensados no sentido paralelo e perpendicular.

Exp, Eyp = módulos de elasticidade teórico paralelo e perpendicular.

(a)  $E_L = E_{Lc}$ ; (b)  $E_L = E_{Lf}$ ; (g)  $E_L = E_{Lfl}$

Frlp, Frtp = módulos de ruptura teórico paralelo e perpendicular

(a)  $F_M = F_{Mc}$ ; (b)  $F_M = F_{Mf}$ ; (c)  $F_M = F_{mfl}$



Tabela 5

Módulos de ruptura teóricos dos compensados considerada toda a seção transversal (em MPa).

*Theoretical moduli of rupture of plywood considering all the transversal section (Mpa).*

Propriedade		Frl												
		(a1)	(12)	(a3)	(b1)	(b2)	(b3)	(e1)	(e2)	(e3)	(f1)	(f2)	(f3)	
MOR paralelo	Média	56,9	26,4	51,7	56,6	26,4	51,6	56,4	26,3	51,6	56,4	26,3	51,6	56,4
	S	12,6	5,6	11,6	12,4	5,7	11,7	12,5	5,7	11,8	12,6	5,7	11,8	12,6
Pinus elliottii	C.V.	22,2	21,3	22,5	22,0	21,6	22,8	22,2	21,7	23,0	22,4	21,7	23,0	22,4
		Frt												
		(a1)	(a2)	(a3)	(b1)	(b2)	(b3)	(e1)	(e2)	(e3)	(f1)	(f2)	(f3)	
MOR perpendicular	Média	28,6	12,7	24,8	27,1	12,4	24,3	26,6	12,4	24,2	26,5	12,4	24,2	26,5
	S	6,3	2,4	5,0	5,4	2,6	5,3	5,7	2,7	5,6	5,9	2,7	5,6	5,9
Pinus elliottii	C.V.	22,2	19,1	20,1	19,9	28,0	21,7	21,3	21,7	23,0	22,4	21,7	23,0	22,4

MOR= módulo de ruptura.

Frl, Frt = módulos de ruptura observados dos compensados na direção paralela e perpendicular.

Frl (a1), Frt(a1), ..., Frl(f3), Frt(f3) = módulos de ruptura teóricos dos compensados na direção paralela e perpendicular.

$$(a1) r = E_T/E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mc}$$

$$(a2) r = E_T/E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mf}$$

$$(a3) r = E_T/E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mff}$$

$$(b1) r = E_T/E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mc}$$

$$(b2) r = E_T/E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mf}$$

$$(b3) r = E_T/E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mff}$$

$$(e1) r = (E_T = 0,045/E_{Lf})/E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mc}$$

$$(e2) r = (E_T = 0,045/E_{Lf})/E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mf}$$

$$(e3) r = (E_T = 0,045/E_{Lf})/E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mff}$$

$$(f1) r = (E_T = 0,045 E_{Lc})/E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mc}$$

$$(f2) r = (E_T = 0,045 E_{Lc})/E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mf}$$

$$(f3) r = (E_T = 0,045 E_{Lc})/E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mff}$$

A Tabela 4 apresenta os resultados médios dos módulos de elasticidade teóricos dos compensados ( $\bar{E}_{xp}$  e  $\bar{E}_{yp}$ ), determinados considerando-se atuantes apenas as lâminas com fibras paralelas ao vão.

Na comparação entre as médias dos módulos de elasticidade teóricos e os observados comprovou-se com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5%, que a análise de variância dos valores teóricos ( $\bar{E}_{xp}$  e  $\bar{E}_{yp}$ ) da equação (g), apresentou significância estatística, e nenhuma significância nos valores calculados das equações (a) e (b) para os dois sentidos.

De uma forma geral, o módulo de elasticidade calculado desta forma, foi inferior ao calculado considerando toda a seção, sendo em média 1,2% para o sentido paralelo e 18% para o perpendicular, porcentagens semelhantes aos encontrados por Freas

(1964), que observou diferenças de 1,1% e 15,3% em compensados compostos de 5 lâminas.

#### Módulo de ruptura

A Tabela 5 apresenta os resultados médios do módulo de ruptura teórico dos compensados, correspondente a doze equações, obtidas a partir das combinações de  $r$  e o módulo de ruptura longitudinal da madeira ( $F_M$ ), considerado no cálculo toda a seção transversal.

Da análise de variância determinou-se diferenças entre os módulos de rupturas, ao nível de 5% de probabilidade.

Foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey, no mesmo nível de probabilidade, que a análise de variância dos módulos de ruptura teóricos (a1, b1, e1 e f1), obtidos



das equações em que foi utilizado o módulo de ruptura longitudinal da madeira em compressão ( $F_{Mc}$ ), mostrou significância estatística, para os dois sentidos.

Nas equações restantes, que não mostraram significância estatística, observa-se, a influência do módulo de ruptura longitudinal da madeira ( $F_{Ml}$ ) e das lâminas ( $F_{Ml}$ ), obtido do teste de flexão estática.

Das equações que melhor estimaram o módulos de ruptura dos compensados, observa-se, uma variação de 0,5% a 9,1% menor para o sentido paralelo e de 5% a 15% também menor no sentido perpendicular, em relação aos valores observados ( $F_{rl}$  e  $F_{rt}$ ).

No cálculo da resistência, considerando somente as lâminas paralelas ao vão (Tabela 4), verificou-se, por meio do teste de Tukey, que não houve significância estatística, para os valores do módulo de ruptura paralelo e perpendicular calculado das equações (b) e (c).

Assim, a melhor estimativa para o módulo de ruptura calculado desta forma, quando comparado ao melhor valor teórico encontrado considerando toda a seção, foi de 1,4% menor no sentido paralelo e 9,8% no caso do sentido perpendicular.

## CONCLUSÃO

O módulo de elasticidade e a resistência à flexão estática dos compensados de *Pinus elliottii*, nos sentidos paralelos e perpendicular, pode ser determinados através de equações teóricas de predição, considerando as propriedades mecânicas da madeira obtidas de ensaios de flexão estática e compressão.

Os melhores resultados teóricos obtidos para o módulo de elasticidade, mostraram uma variação de 7,6% maior em relação ao valor observado para o sentido paralelo, e de 0,4% menor para o sentido perpendicular. Para o módulo de ruptura estes resultados foram de 0,5% menor para o sentido paralelo, e de 5% menor para o sentido perpendicular.

O módulo de elasticidade e de ruptura no sentido paralelo do compensado, podem também ser estimados teoricamente, considerando no cálculo somente atuantes as lâminas sob tensão paralelas ao vão. Os valores obtidos desta forma apresentaram uma variação de aproximadamente 1% menor, com respeito aos valores obtidos considerando toda a seção.

---

## AUTOR

HERNANDO ALFONSO LARA PALMA é Professor no Departamento de Ciências Florestais da UNESP - Universidade Estadual Paulista. Caixa Postal 237 - 18603-970 - Botucatu, SP.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM). *Wood, adhesives, part. 22*. Philadelphia, 1981.
- BODIG, J.; GOODMAN, J.R. Prediction of elastic parameters for wood. *Wood Science*, v.5, n.4, p.249-264, 1973.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. 711p.
- BOOTH, M.A. Predicting the bending strength of structural plywood. *J. Inst. Wood Sci.*, v.12, n.1, p.14-47, 1990.
- BURDZIK, W.M.G.; VAN RENSBERG, B.W.J. Derivation of grade stresses for South African pine plywood. *South African Forestry Journal*, n.158, p.11-16, 1991.
- CURRY, W.T.; HEARMON, R.F.S. The strength properties of plywood. In: The princes Risborough Laboratory of building research establishment. *The strength properties of timber*. Lancaster: MTP Construction, 1974.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). Prüfung von holz. Din 52192. Berlin, 1979.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood Handbook: Wood as an engineering material*. Washington: United States Department of Agriculture, 1987. 466p.
- FREAS, A.D. *The bending strength and stiffness of plywood*. Madison: USDA. Forest Service, 1964. 56p. (FPL Report n.059)
- GURFINKEL, G. *Wood engineering*. New Orleans: Southern Forest Products Association, 1973. 573p.
- HOWARD, J.; HANSEN, C.E. *Modern timber design*. New York: John Wiley, 1962. 312p.
- MARCH, H.W. *Stress-strain relations in wood and plywood considered as orthotropic materials*. Wiscosin: USDA. Forest Service, Forest Products Laboratory, 1944. 24p.
- MCLAIN, T.E.; BODIG, J. Determination of elastic parameters of full-size wood composite boards. *Forest Product Journal*, v.24,n.4,p.48-57,1974.