

## Avaliação da qualidade na produção industrial de compensados por meio de testes de flexão e de cisalhamento

**Tiago Hendrigo de Almeida**, *Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (UNESP). e-mail: tiago.hendrigo@grad.itapeva.unesp.br*

**Diego Henrique de Almeida, Fabiane Salles Ferro, Luciano Donizeti Varanda**, *Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP. e-mail: almeidadh@usp.br, fsferro@usp.br, lu.varanda@hotmail.com*

**Cristiane Inácio de Campos**, *Professora Doutora, Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (UNESP). e-mail: cristiane@itapeva.unesp.br*

**André Luis Christoforo**, *Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG. e-mail: alchristoforo@yahoo.com.br*

**Francisco Antônio Rocco Lahr**, *Professor Titular, Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP. e-mail: frocco@sc.usp.br*

**Resumo:** Este trabalho objetivou investigar, por meio da análise de variância (ANOVA), a homogeneidade obtida no processo de fabricação de painéis compensados feitos por uma empresa no interior do estado do Paraná (PR - Brasil). Foram escolhidos aleatoriamente quatro compensados da linha de produção dos painéis (1,25mx2,50mx18mm), fabricados com madeira de *Pinus sp.* e resina fenólica, constituídos de 13 lâminas. As propriedades mecânicas utilizadas para o estudo foram: módulo de resistência (MOR) e de elasticidade (MOE) na flexão estática, obtidos nas direções paralela e perpendicular, e resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_v$ ). Além da homogeneidade na fabricação, foram avaliados também os quesitos de MOE. Os resultados da ANOVA revelaram a não equivalência entre duas das cinco respostas investigadas, evidenciando a não homogeneidade conseguida pela empresa na fabricação dos painéis, e com relação ao MOE, os obtidos na direção paralela apresentaram valores médios superiores ao quesito (4000 MPa) da norma brasileira ABNT NBR 9533:1986. Para resultados a respeito da homogeneidade na fabricação dos painéis com maior confiabilidade, faz-se necessário o desenvolvimento de novas pesquisas envolvendo um número maior de painéis para estudo.

**Palavras-chave:** painéis compensados, flexão, cisalhamento, análise de variância.

**Quality assessment in industrial production of plywood via bending and shear tests**

**Abstract:** This research aimed to investigate, by analysis of variance (ANOVA), the homogeneity achieved in the manufacturing process of plywood made by a company in the state of Paraná (PR - Brazil). Were selected four panels (randomly) of the line production (1.25mx2.50mx18mm) made with *Pinus sp.* wood and phenolic resin, consisting of 13 blades. The mechanical properties used for the study were: strength modulus (MOR) and modulus of elasticity (MOE) in bending, obtained in two directions (parallel and perpendicular), and shear strength in glue line ( $f_v$ ). Besides the homogeneity in manufacturing, were also assessed minimal values for MOE. ANOVA results revealed the non-equivalence between two of the five responses investigated, showing the non-homogeneity achieved by the company in the manufacture of plywoods, and with respect to the MOE, obtained in the parallel direction showed higher values than the minimal value (4000 MPa) requested by the Brazilian standard ABNT NBR 9533:1986. For results regarding the homogeneity in the manufacture of panels with greater reliability, it is necessary the development of new research involving a larger number of panels to study.

**Keywords:** plywood, bending test, shear test, analysis of variance.

## 1. Introdução

O compensado é um painel à base de lâminas de madeira coladas entre si com adesivo e pressão pela técnica de laminação cruzada, ou seja, a direção das fibras de uma lâmina está em ângulos retos em relação à camada adjacente.

A disposição das lâminas de madeira no painel e a utilização de adesivo conferem ao compensado maior estabilidade dimensional e propriedades mecânicas mais uniformes em relação à madeira maciça, diminuindo a anisotropia da madeira maciça.

Os adesivos para compensados mais utilizados industrialmente são a uréia-formaldeído, melanina-formaldeído e fenol-formaldeído. É determinante para a vida útil de um compensado a sua devida utilização de acordo com a sua recomendação de uso. De forma genérica, para usos interno, intermediário e externo recomendam-se a uréia-formaldeído, melanina-formaldeído e fenol-formaldeído (Iwakiri, 2005<sup>(1)</sup>), respectivamente.

Atualmente existe escassez de madeiras tropicais para as diversas finalidades, entre elas, para utilização como matéria-prima em indústrias que produzem lâminas e compensados. Uma boa alternativa para suprir a demanda desse setor fornecendo madeiras de boa qualidade são os reflorestamentos dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (Iwakiri et al., 2000<sup>(2)</sup>; Iwakiri et al., 2012<sup>(3)</sup>).

As pesquisas acerca das propriedades de resistência e rigidez de compensados utilizando madeira do gênero *Pinus* são importantes para os fins que possam ser destinados, entre eles a construção civil e a indústria (Stamato, 1998<sup>(4)</sup>; Iwakiri et al., 2000<sup>(2)</sup>; Stamato e Calil Junior, 2002<sup>(5)</sup>).

Na produção de compensados os módulos de elasticidade (MOE) e de resistência (MOR) na flexão são as propriedades mais requisitadas na caracterização de um lote de compensados. Estas variáveis são determinadas a partir de ensaios mecânicos padronizados pela norma brasileira ABNT NBR 9533:1986<sup>(6)</sup> “Determinação da resistência à flexão estática de compensados”.

Em pesquisas sobre os valores de MOE e o MOR de compensados produzidos com *Pinus taeda* e *Pinus oocarpa* com três formulações diferentes de adesivo fenol formaldeído, os autores concluíram que características anatômicas da madeira (madeiras de lenho juvenil e adulto, largura dos anéis de crescimento e lenhos inicial e tardio) tenham influenciado nas propriedades mecânicas dos compensados investigados (Iwakiri et al., 2002<sup>(2)</sup>).

Ferreira et al. (2011)<sup>(7)</sup> trabalharam com compensados de *Pinus sp.* e três formulações diferentes de adesivos PVA e duas combinações de temperatura e tempo de prensagem, encontrando valores inferiores de MOE e MOR quando comparados com painéis produzidos com adesivos ureia-formaldeído e fenol-formaldeído, que são os mais utilizados pelas indústrias do setor.

Almeida et al. (2012)<sup>(8)</sup> trabalharam com compensados fabricados com madeira de um híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribea* var. *hondurensis* analisando dois pontos de retiradas da tora no tronco, duas gramaturas de adesivo (380 e 420 g/cm<sup>2</sup>) e dois tempos de prensagem (8 e 12 minutos). Entre as conclusões dos autores, a madeira desse híbrido apresentou bons resultados para confecção de compensados para fins como construção civil, móveis e embalagens.

Com o objetivo de avaliar a homogeneidade na fabricação de painéis compensados de *Pinus sp.* fabricados por uma indústria do interior do estado do Paraná, assim como do atendimento ao quesito de rigidez (MOE), foram adquiridos painéis da empresa e testados à flexão estática (direções paralela e normal) e ao cisalhamento na linha de cola, possibilitando, com o auxílio da análise de variância, investigar as possíveis diferenças de resultados entre os painéis.

## 2. Materiais e métodos

Para esta pesquisa foram utilizados quatro painéis (fig. 1) de compensados coletados aleatoriamente da linha de produção de uma indústria do interior do estado do Paraná. Os

painéis foram fabricados com lâminas torneadas de madeira do gênero *Pinus sp.* com dimensões de 1,25m×2,50m×18mm, possuindo em cada painel 13 lâminas coladas com resina fenólica.



Figura 1 – Compensado em madeira de *Pinus sp.*

De cada painel foram extraídos 10 corpos de prova para os ensaios de flexão estática (fig. 2) com as fibras alinhadas na direção paralela ( $MOR_{par}$ ,  $MOE_{par}$ ), 10 corpos de prova para os ensaios de flexão estática com as fibras alinhadas na direção perpendicular ( $MOR_{per}$ ,  $MOE_{per}$ ) e 12 corpos de prova para os testes de cisalhamento ( $f_v$ ), totalizando 128 corpos de prova.



Figura 2 – (a) confecção dos corpos de prova; (b) ensaio de flexão estática.

O MOE e MOR dos painéis para ambas as orientações das lâminas externas foram obtidos de acordo com as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 9533:1986<sup>(6)</sup>, e para os ensaios de cisalhamento na linha de cola, foram utilizadas as normas ABNT NBR 12466-1: 2007<sup>(9)</sup> e ABNT NBR 12466-1: 2007<sup>(10)</sup>.

A verificação da equivalência estatística entre as propriedades mecânicas investigadas (homogeneidade na fabricação dos painéis) foi realizada pela análise de variância (ANOVA) de Kruskal-Wallis (não paramétrica) e do teste de comparações múltiplas entre postos de Student-Newman-Keuls, com o auxílio do software BioEstat® versão 5.0. O nível de significância ( $\alpha$ ) estipulado para a ANOVA foi de 5%, e a hipótese nula ( $H_0$ ) formulada consistiu na equivalência entre médias, implicando na não equivalência entre médias para a hipótese alternativa ( $H_1$ ). P-valor do teste de Kruskal-Wallis inferior ao nível de significância implica em aceitar  $H_0$ , refutando-a em caso contrário.

### 3. Resultados e discussões

A tab. 1 apresenta os valores médios ( $x_m$ ), coeficientes de variação ( $C_v$ ) e os valores mínimos (Mín) e máximos (Máx) encontrados das propriedades mecânicas investigadas por painel.

Tabela 1 – Resultados das propriedades físicas e mecânicas.

| PAINEL 1           |                          |                          |                          |                          |                      |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| Estatística        | MOR <sub>par</sub> (MPa) | MOE <sub>par</sub> (MPa) | MOR <sub>per</sub> (MPa) | MOE <sub>per</sub> (MPa) | f <sub>v</sub> (MPa) |
| $x_m$              | 52,57                    | 8322                     | 30,81                    | 3837                     | 2,69                 |
| C <sub>v</sub> (%) | 13                       | 9                        | 23                       | 11                       | 19                   |
| Mín                | 41,20                    | 7085                     | 21,56                    | 3138                     | 1,85                 |
| Máx                | 64,08                    | 9485                     | 44,91                    | 4371                     | 3,59                 |
| PAINEL 2           |                          |                          |                          |                          |                      |
| Estatística        | MOR <sub>par</sub> (MPa) | MOE <sub>par</sub> (MPa) | MOR <sub>per</sub> (MPa) | MOE <sub>per</sub> (MPa) | f <sub>v</sub> (MPa) |
| $x_m$              | 61,53                    | 8984                     | 25,08                    | 3306                     | 2,63                 |
| C <sub>v</sub> (%) | 14                       | 10                       | 23                       | 8                        | 26                   |
| Mín                | 53,03                    | 7358                     | 16,37                    | 2738                     | 1,50                 |
| Máx                | 74,42                    | 10309                    | 35,55                    | 3571                     | 3,34                 |
| PAINEL 3           |                          |                          |                          |                          |                      |
| Estatística        | MOR <sub>par</sub> (MPa) | MOE <sub>par</sub> (MPa) | MOR <sub>per</sub> (MPa) | MOE <sub>per</sub> (MPa) | f <sub>v</sub> (MPa) |
| $x_m$              | 51,15                    | 8027                     | 32,96                    | 4138                     | 3,21                 |
| C <sub>v</sub> (%) | 16                       | 12                       | 25                       | 15                       | 21                   |
| Mín                | 36,15                    | 5681                     | 19,73                    | 3070                     | 2,31                 |
| Máx                | 60,41                    | 9341                     | 43,51                    | 4976                     | 4,79                 |
| PAINEL 4           |                          |                          |                          |                          |                      |
| Estatística        | MOR <sub>par</sub> (MPa) | MOE <sub>par</sub> (MPa) | MOR <sub>per</sub> (MPa) | MOE <sub>per</sub> (MPa) | f <sub>v</sub> (MPa) |
| $x_m$              | 62,44                    | 8784                     | 32,78                    | 4066                     | 2,99                 |
| C <sub>v</sub> (%) | 11                       | 8                        | 21                       | 14                       | 22                   |
| Mín.               | 54,98                    | 7855                     | 21,22                    | 3116                     | 1,91                 |
| Máx.               | 73,82                    | 9799                     | 45,75                    | 4964                     | 3,92                 |

Os valores médios para as propriedades mecânicas dos compensados industriais foram inferiores aos determinados para os compensados confeccionados em escala laboratorial produzidos com PVA, com valores de MOR<sub>par</sub>, MOE<sub>par</sub> e f<sub>v</sub> de 58,43 MPa, 8454 MPa e 3,83 MPa, respectivamente (Silva, 2011)<sup>(11)</sup>). Moraes (2008)<sup>(12)</sup> obteve para compensados de *Pinus* produzidos com adesivo poliuretano bicomponente, f<sub>v</sub> igual a 1,81 MPa, demonstrando assim a superioridade dos compensados industriais aqui caracterizados. A norma brasileira ABNT NBR 9532: 1986<sup>(6)</sup> especifica MOE de 4000 MPa para compensados destinados à formas de concreto, sem menção de número de camadas e direção. Sendo assim, observa-se que todos os painéis estudados, com as lâminas externas orientadas na direção paralela, encontram-se em conformidade com a norma para esta propriedade. A tab. 2 apresenta os resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis das propriedades mecânicas investigadas (GL - graus de liberdade), estando sublinhados os P-valores considerados significativos.

Tabela 2 – Resultados das propriedades físicas e mecânicas.

| Estatística | MOR <sub>par</sub> | MOE <sub>par</sub> | MOR <sub>per</sub> | MOE <sub>per</sub> | f <sub>v</sub> |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| H           | 14,0415            | 6,1670             | 7,5033             | 13,5761            | 2,5362         |
| GL          | 3                  | 3                  | 3                  | 3                  | 3              |
| P-valor     | 0,0028             | 0,1038             | 0,0574             | 0,0035             | 0,4688         |

Da tab. 2, os P-valores encontrado da ANOVA para o MOR<sub>par</sub> e MOE<sub>per</sub> foram inferiores a 5%, revelando a não equivalência de resultados entre os painéis, o mesmo não ocorrendo com as demais propriedades, que apresentaram resultados equivalentes independente da escolha dos painéis.

#### 4. Conclusões

Por meio dos resultados obtidos é possível concluir que:

- As propriedades mecânicas dos painéis compensados produzidos industrialmente tiveram valores inferiores quando comparados com painéis produzidos em laboratório com PVA, porém, com resistência na linha de cola superior aos compensados da literatura produzidos com resina poliuretana derivada de mamona. A propriedade de MOE<sub>par</sub> para os painéis industriais atendeu ao respectivo documento normativo;
- Com exceção do MOR<sub>par</sub> e MOE<sub>per</sub>, os valores das demais propriedades mecânicas foram equivalentes entre os painéis fabricados, evidenciando, para os painéis escolhidos e utilizados nesta pesquisa, a não homogeneidade obtido no processo de fabricação, entretanto, para um número maior de painéis coletados, este resultado pode ser diferente, fazendo-se necessário o desenvolvimento de novas pesquisas;

Neste contexto, novas tecnologias de produção, principalmente no que diz respeito a emprego de matérias-primas alternativas, tal como o tipo de adesivo, podem agregar desempenho aos painéis compensados, aumentando a potencialidade dos materiais fabricados.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Campus Experimental da UNESP de Itapeva pelos recursos disponibilizados para realização da pesquisa, bem como à Indústria que doou os painéis de compensados. Também agradecem à CAPES e à CNPq pelos recursos financeiros.

#### 6. Referências

- (1) Iwakiri, S. (2005). *Painéis de madeira reconstituída*. FUPEF. 254 p.
- (2) Iwakiri, S.; Nielsen, I. R.; Alberti, R. A. R. (2000). *Avaliação da influência de diferentes composições de lâminas em compensados estruturais de Pinus elliottii e Eucalyptus saligna*, Revista Cerne, v.6, n.2, p. 19-24.
- (3) Iwakiri, S.; Matos, J. L. M.; Ferreira, E. S.; Prata, J. G.; Trianoski, R. (2012). *Produção de painéis compensados estruturais com diferentes composições de lâminas de Eucalyptus saligna e Pinus caribea*. Revista Árvore, v.36, n.3, p. 596-576.
- (4) Stamato, G. C. (1998). *Resistência ao embutimento da madeira compensada*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- (5) Stamato, G. C.; Calil Junior, C. (2002). *Resistência ao embutimento da madeira compensada*. Cadernos de Engenharia de Estruturas, n.18, p. 49-76.
- (6) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). ABNT NBR 9533 - *Determinação da resistência à flexão estática de compensados*. Rio de Janeiro.
- (7) Ferreira, B. S.; Silva, M. S.; Campos, C. I. (2011). *Análise do desempenho físico-mecânico de compensados produzidos com adesivos a base de PVA*. Madeira: Arquitetura e Engenharia, v. 12, n.29, p. 13-22.

- (8) Almeida, N. F.; Bortolletto Junior, G.; Mendes, R. F.; Suardi, P. G. (2012). *Avaliação da madeira de Pinus elliottii var. elliottii x Pinus caribaea var. hondurensis para produção de compensados*. Scientia Forestalis, v. 40, n.96, p. 435-443.
- (9) Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). ABNT NBR 12466-1 – *Madeira compensada - Qualidade de colagem. Parte 1: Métodos de Ensaios*. Rio de Janeiro.
- (10) Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). ABNT NBR 12466-2 - *Madeira compensada - Qualidade de colagem. Parte 2: Requisitos*. Rio de Janeiro.
- (11) Silva, M. S. (2011). *Análise do desempenho físico-mecânico de painéis compensados de Pinus sp. produzidos com adesivos aquosos a base de poliacetato de vinila e de homopolímero vinílico*. Monografia (Graduação). Campus Experimental de Itapeva, Universidade Estadual Paulista.
- (12) Morais, C. A. G. (2008). *Análise de linha de cola nas direções paralela e normal às fibras em painéis de madeira compensada produzidos com lâminas de Pinus sp. e Eucalyptus sp. e adesivo poliuretano bicomponente*. Monografia (Graduação). Campus Experimental de Itapeva, Universidade Estadual Paulista.