

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS, BIOLÓGICAS
E AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PAINÉIS DE
LÂMINAS PARALELAS (LVL) COM MADEIRA DE *Pinus*
oocarpa E *P. kesiya***

FREDERICO DE SOUZA

**ORIENTADOR: PROF. DR. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL
MENEZZI**

**CO-ORIENTADOR: PROF. DR. GERALDO BORTOLETTO
JÚNIOR**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO PPGEFL.DM-122/2009

BRASÍLIA, MARÇO - 2009.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS, BIOLÓGICAS E AVALIAÇÃO
NÃO-DESTRUTIVA DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL) COM
MADEIRA DE *Pinus oocarpa* E *P. kesiya*

FREDERICO DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI, Doutor (Departamento de
Engenharia Florestal – UnB). (**Orientador**)

ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO, Doutor (Departamento de Produtos
Florestais – UFRRJ). (**Examinador Externo**)

ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal
– UnB). (**Examinador Interno**)

AILTON TEIXEIRA DO VALE, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal –
UnB). (**Membro Suplente**)

Brasília, 31 de março de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, FREDERICO DE

Propriedades Mecânicas, Físicas, Biológicas e Avaliação Não-Destrutiva de Painéis de Lâminas Paralelas (LVL) com Madeira de *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*. 2009.

xv, 133p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB), Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Painéis de Lâminas Paralelas (LVL)

2. Avaliações não-destrutivas

3. Propriedades Físicas, Mecânicas e Biológicas

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, F. (2009) Propriedades mecânicas, físicas, biológicas e avaliação não-destrutiva de painéis de lâminas paralelas (LVL) com madeira de *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-122/2009, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Frederico de Souza

TÍTULO: Propriedades mecânicas, físicas, biológicas e avaliação não-destrutiva de painéis de lâminas paralelas (LVL) com madeira de *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Frederico de Souza

Setor de Mansões Park-Way - SMPW, Quadra 05, Conjunto 01, Lote 08, Casa D
71735-501 Núcleo Bandeirante, DF, Brasil.

AGRADECIMENTOS

. Primeiramente aos meus pais Luiz Alberto de Souza e Vera Lúcia Lima Heggdorne, grandes incentivadores dos meus estudos e que puderam me oferecer um ensino de qualidade, o que proporcionou a minha passagem pela graduação e pós-graduação em uma universidade conceituada;

. À minha noiva Alessandra Rocha Metzner por todo apoio, incentivo e carinho nas horas difíceis da graduação e do mestrado, principalmente pela paciência nas longas explicações da minha dissertação;

. Aos meus irmãos: Luiz Alberto de Souza Júnior e Luany Cristina de Souza, também pelo incentivo a estudar cada vez mais, na busca de um futuro melhor para a família;

. Ao meu orientador, o Prof. Dr. Cláudio H. S. Del Menezzi, ao qual tenho profunda admiração e respeito, pela pessoa que é e pelo que faz profissionalmente. Graças ao “Claudião” tive oportunidades no meio acadêmico, passando por projeto de iniciação científica e projeto final, chegando nesta dissertação de mestrado;

. Ao meu co-orientador, o Prof. Dr. Geraldo Bortoletto Júnior da ESALQ/USP por todo o seu conhecimento em painéis de madeira, pela liberação de material e ajuda na confecção dos painéis LVLs;

. À empresa Schenectady Crios, situada no município de Rio Claro-SP, doadora do adesivo para a confecção dos painéis;

. Ao Analista Ambiental do LPF/SFB, Mário Rabelo grande incentivador para a conclusão desta dissertação. Agradeço pelo seu conhecimento nas diversas áreas do conhecimento e pelo apoio na realização dos testes físicos e mecânicos;

. Ao Analista Ambiental do LPF/SFB Alencar Garlet, por todo o seu conhecimento, estrutura e dedicação na realização dos ensaios de biodeterioração no laboratório de biodeterioração da madeira;

. À minha “eterna orientadora”, Esmeralda Okino, Analista Ambiental do LPF/SFB na área de química da madeira, carinhosamente conhecida como Anne, com a qual aprendi muito sobre a pesquisa e o meio acadêmico. Agradeço pela sua generosidade, paciência e carinho;

. Aos amigos Ricardo, Airton, Igor, Alex, Joana, Leiliane, Camila e tantos outros que apoiaram e contribuíram para um maior aprendizado e diversões nas horas de lazer durante a graduação e mestrado;

- . Ao Ariel, pelo acolhimento em sua residência em Piracicaba, quando estive presente para a confecção dos painéis;
- . Aos funcionários do LPF/SFB: João, Fernando, Ricardo, Lopes, Lula, Gregório, Dionísio, entre outros; que contribuíram na confecção dos corpos-de-prova e na realização de etapas desta dissertação;
- . À Universidade de Brasília (UnB) e ao Departamento de Engenharia Florestal (EFL) por ter me proporcionado um estudo de qualidade e ter contribuído em uma sólida estrutura para a minha formação profissional;
- . Ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais do Departamento de Engenharia Florestal/UnB;
- . Em especial: aos Laboratórios de Química da Madeira, Biodegradação e Preservação da Madeira, Engenharia e Física da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), vinculado ao Serviço Florestal Brasileiro;
- . À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz (ESALQ), campus da USP em Piracicaba-SP, pela sua estrutura e pelo laboratório de Laminação e Painéis de Madeira;
- . À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela ajuda financeira na concessão da bolsa de mestrado;
- . À Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FINEP, pelo apoio financeiro na aquisição de equipamentos utilizados nesta dissertação de mestrado;
- . À Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento – FUNTEC, pelo suporte técnico na realização de pesquisas e na participação de eventos científicos que muito contribuíram para a minha formação profissional.

A minha noiva

Alessandra Rocha Metzner

A meus pais

Vera Lúcia Lima Heggdorne e
Luiz Alberto de Souza

A meus irmãos

Luiz Alberto de Souza Júnior e
Luany Cristina de Souza

E a outros familiares e amigos,

Dedico.

RESUMO

PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS, BIOLÓGICAS E AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL) COM MADEIRA DE *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*.

Autor: Frederico de Souza

Orientador: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Co-Orientador: Dr. Geraldo Bortoletto Júnior

Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais

Brasília, março de 2009.

Painéis estruturais de lâminas paralelas ou *laminated veneer lumber* (LVL) são painéis estruturais onde as lâminas de madeira são coladas paralelamente entre si com adesivos estruturais, usando-se altas temperaturas e pressões. Os LVLs são utilizados em substituição à madeira sólida para fins estruturais, principalmente em flanges de vigas de seção “T”. Confeccionaram-se quatro painéis LVLs sem prévia classificação das lâminas para cada espécie (*Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl - *PO* e *Pinus kesiya* Royle ex Gordon - *PK*, sorteando-se 22 lâminas de 2 mm de espessura, usando-se adesivo fenol-formaldeído à 190 g/m², à 150°C por 45 minutos e 1,1 MPa de pressão específica. Avaliaram-se as seguintes propriedades de acordo com as normas específicas: na avaliação não-destrutiva – AND (velocidade de propagação das ondas de tensão – V_0 e módulo de elasticidade dinâmico – E_{md}), em flexão estática (módulo de elasticidade – E_m e módulo de ruptura – f_m), em compressão paralela às fibras (resistência máxima à compressão paralela – $f_{c,0}$), no cisalhamento paralelo e perpendicular à linha de cola (resistência máxima ao cisalhamento paralelo – $f_{v,0}$ e perpendicular – $f_{v,90}$), inchamento em espessura (IE), absorção de água (ABS) e taxa de não-retorno ($TNRE$), nos períodos de 2, 24 e 96 horas de imersão em água, perda de massa em podridão branca (PMPB), (*Trametes versicolor*) e podridão parda (PMPP) (*Gloeophyllum trabeum*). Os painéis LVLs de *PO* e *PK* não apresentaram delaminações ou bolhas. Os painéis de *PK* foram mais eficientes nas propriedades mecânicas: E_m , E_{md} , V_0 , f_m , $f_{c,0}$; os de *PO* apresentaram menores ABS , IE e $TNRE$ nos três períodos observados. A densidade aparente, o $f_{v,0}$ e $f_{v,90}$ foram iguais estatisticamente. A PMPB e PMPP foram estatisticamente iguais, sendo mais intensa na PMPP em ambos os LVLs. A predição das propriedades mecânicas por AND não foram eficientes em virtude da não pré-classificação das lâminas na confecção dos LVLs.

Palavras-chave: Painéis de Lâminas Paralelas (LVL), Propriedades Mecânicas, Físicas e Biológicas, Avaliação Não-Destrutiva (AND).

ABSTRACT

MECHANICAL, PHYSICAL, BIOLOGICAL PROPERTIES AND NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) WITH *Pinus oocarpa* AND *P. kesiya* WOOD.

Author: Frederico de Souza

Advisor: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Co-Advisor: Dr. Geraldo Bortoletto Júnior

Post-Graduate Program on Forest Sciences

Brasília, march of 2009.

Laminated veneer lumber (LVL) is a structural board in which lumber veneers are glued together with structural adhesives at high temperatures and pressures. LVL are more commonly used to replace solid wood in “I”-beam flanges. This study aimed to evaluate the mechanical, physical and biological properties of LVL made from *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl (PO) and *Pinus kesiya* Royle ex Gordon (PK) and to provide a nondestructive characterization thereof. Four PO and four PK LVL boards formed by 22 randomly selected 2-mm wide veneers were produced according to the following characteristics: phenol-formaldehyde (190g/m²), hot-pressing at 150°C for 45 minutes and 2.8 N/mm² of specific pressure. Properties evaluated included: stress wave velocity (V_0), dynamic modulus of elasticity (E_{md}), static bending modulus of elasticity (E_m) and modulus of rupture (f_m), parallel compression strength ($f_{c,0}$), parallel shear strength ($f_{gv,0}$) and perpendicular shear strength ($f_{gv,90}$), thickness swelling (TS), water absorption (WA) and permanent thickness swelling (PTS) for 2, 24 and 96-hour of water immersion, weight loss by *Trametes versicolor* (Linnaeus ex Fries) Pilát (white rot) and *Gloeophyllum trabeum* (Persoon ex Fries.) Murrill (brown rot). After hot-pressing, no bubbles, delamination or warping were observed for both species. In general, PK boards presented higher mechanical properties: E_m , E_{md} , V_0 , f_m , $f_{c,0}$ whereas PO boards were dimensionally more stable, with lower WA, TS and PTS in the 2, 24 and 96-hour immersion periods. Board density and $f_{gv,0}$, $f_{gv,90}$ and rot weight loss are statistically equal for PO and PK LVL. It was not very efficient the prediction of flexural properties of consolidated LVL by the nondestructive method used.

Key-words: Laminated Veneer Lumber (LVL), Mechanical Properties, Physical Properties, Biological properties, Non-Destructive Evaluation (NDE)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. HIPÓTESES	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. O GÊNERO <i>Pinus</i>	4
3.1.1. <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schldl.	4
3.1.2. <i>Pinus kesiya</i> Royle ex Gordon	5
3.2. COMPOSTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA	6
3.3. ADESIVOS ESTRUTURAIS: A RESINA FENOL - FORMALDEÍDO	8
3.4. O PAINEL DE LÂMINAS PARALELAS (LVL)	10
3.4.1. Processo de produção industrial	11
3.4.2. Vantagens comparativas	12
3.4.3. Principais usos	13
3.4.4. Propriedades mecânicas e fatores influentes	14
3.4.4.1 Efeito do eixo estrutural na análise estática.....	15
3.4.4.2. Efeito do tipo de adesivo	16
3.4.4.3. Efeito da espécie de madeira	17
3.4.4.4. Efeito do tempo e temperatura de prensagem	20
3.4.5. Propriedades físicas e fatores influentes.....	20
3.4.5.1. Efeito dos processos industriais.....	25
3.5. AVALIAÇÕES NÃO-DESTRUTIVAS (AND).....	25
3.5.1. Efeito do eixo estrutural na avaliação não-destrutiva.....	28
3.5.2. Efeito do teor de umidade contido no material.....	30
3.6. BIODETERIORAÇÃO	32
3.6.1. Podridão branca	35
3.6.2. Podridão parda.....	36
3.6.3. Biodeterioração de painéis de madeira.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1. CONFECÇÃO DOS PAINÉIS LVLS.....	41
4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	43
4.2.1. Avaliação não-destrutiva (AND).....	43
4.2.2. Ensaio de resistência à flexão estática	45
4.2.3. Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras	47
4.2.4. Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular.....	48
4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS	50
4.3.1. Ensaio de absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura	50
4.3.2. Avaliação do gradiente vertical de densidade	52
4.4. PROPRIEDADE BIOLÓGICA.....	53
4.4.1. Ensaio de biodeterioração.....	53

4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	58
5.1.1. Resistência à flexão estática.....	58
5.1.2. Resistência à compressão paralela às fibras.....	61
5.1.3. Resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular à linha-de-cola.....	63
5.1.4. Avaliação não-destrutiva (AND).....	66
5.1.4.1. Efeito da espécie e do eixo estrutural na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) e no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}).	66
5.1.4.2. Predição das propriedades mecânicas pela avaliação não-destrutiva.....	71
5.2. PROPRIEDADES FÍSICAS.....	74
5.2.1. Densidade.....	74
5.2.2. Absorção de água e inchamento em espessura.....	75
5.2.3. Taxa de não-retorno em espessura.....	78
5.2.4. Gradiente vertical de densidade.....	78
5.3. PROPRIEDADES BIOLÓGICAS.....	80
5.4. SUMÁRIO DOS RESULTADOS.....	86
6. CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÊNDICES.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Densidades aparentes observadas para painéis LVLs em diferentes estudos	24
Tabela 02. Características e modificações químico-anatômicas causadas por fungos de podridão branca e parda	34
Tabela 03. Perda de massa (%) observada em painéis OSB tratados termicamente após ataque de fungos de podridão branca e podridão parda	39
Tabela 04. Propriedades da resina fenol-formaldeído CR - 7010	41
Tabela 05. Formulação do adesivo a ser utilizado no projeto	42
Tabela 06. Parâmetros utilizados no ensaio de resistência à flexão estática em painéis LVLs confeccionados com <i>Pinus oocarpa</i> e <i>Pinus kesiya</i>	46
Tabela 07. Classes de resistência à biodeterioração com relação à perda de massa	56
Tabela 08. Dados para comparação entre as espécies estudadas de LVL e referências bibliográficas.....	60
Tabela 09. Relação existente entre a velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) e o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para as posições de ensaio <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	69
Tabela 10. Valores médios da densidade em painéis LVLs	74
Tabela 11. Valores médios para a taxa de não-retorno em espessura observados nos painéis LVLs	78
Tabela 12. Análise de regressão polinomial de segundo grau, para os quatro trechos do gradiente vertical de densidade observado para os painéis LVLs	80
Tabela 13. Médias das perdas de massa (%) e respectivas classes de resistências para as madeiras de referência <i>Pinus spp</i> e <i>Cecropia spp</i>	81
Tabela 14. Comparação entre os painéis LVLs confeccionados com <i>Pinus oocarpa</i> e <i>Pinus kesiya</i> para todas as propriedades mecânicas, físicas e biológicas avaliadas.	87
Tabela 15. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade (E_m) em ensaio de resistência à flexão estática, <i>posição flatwise</i>	100
Tabela 16. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de ruptura (f_m) em ensaio de resistência à flexão estática, <i>posição flatwise</i>	100
Tabela 17. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade (E_m) em ensaio de resistência à flexão estática, <i>posição edgewise</i>	100
Tabela 18. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de ruptura (f_m) em ensaio de resistência à flexão estática, <i>posição edgewise</i>	101
Tabela 19. Análise de variância para o efeito da espécie na resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$).	101
Tabela 20. Análise de variância para o efeito da espécie na resistência ao cisalhamento paralelo ($f_{v,0}$).	101
Tabela 21. Análise de variância para o efeito da espécie na resistência ao cisalhamento perpendicular ($f_{v,90}$).....	102
Tabela 22. Análise de variância para o efeito da espécie na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) em <i>posição flatwise</i>	102
Tabela 23. Análise de variância para o efeito da espécie na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) em <i>posição edgewise</i>	102
Tabela 24. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) em <i>posição flatwise</i>	103

Tabela 25. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) em posição <i>edgewise</i>	103
Tabela 26. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para <i>Pinus oocarpa</i>	103
Tabela 27. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para <i>Pinus kesiya</i>	103
Tabela 28. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para <i>Pinus oocarpa</i>	104
Tabela 29. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para <i>Pinus kesiya</i>	104
Tabela 30. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para <i>Pinus oocarpa</i>	104
Tabela 31. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para <i>Pinus kesiya</i>	104
Tabela 32. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para <i>Pinus oocarpa</i>	105
Tabela 33. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para <i>Pinus kesiya</i>	105
Tabela 34. Análise de variância para o efeito da espécie na densidade aparente para os painéis LVLs	105
Tabela 35. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de absorção de água no período de 2 horas de imersão em água nos painéis LVLs.....	106
Tabela 36. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de absorção de água no período de 24 horas de imersão em água nos painéis LVLs.....	106
Tabela 37. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de absorção de água no período de 96 horas de imersão em água nos painéis LVLs.....	106
Tabela 38. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de inchamento em espessura no período de 2 horas de imersão em água para os painéis LVLs	107
Tabela 39. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de inchamento em espessura no período de 24 horas de imersão em água para os painéis LVLs	107
Tabela 40. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de inchamento em espessura no período de 96 horas de imersão em água para os painéis LVLs	107
Tabela 41. Análise de variância para o efeito da espécie sobre a taxa de não-retorno em painéis LVLs	108
Tabela 42. Análise de variância para o efeito da espécie sobre a perda de massa (%) para o fungo de podridão branca <i>Trametes versicolor</i> em painéis LVLs.....	108
Tabela 43. Análise de variância para o efeito da espécie sobre a perda de massa (%) para o fungo de podridão parda <i>Gloeophyllum trabeum</i> em painéis LVLs.....	108
Tabela 44. Dados para o ensaio de resistência à flexão estática.....	109
Tabela 45. Dados para a resistência à compressão paralela às fibras.....	110
Tabela 46. Dados para a resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular às fibras	111
Tabela 47. Dados para avaliação não-destrutiva (AND) posição <i>flatwise</i>	112
Tabela 48. Dados para avaliação não-destrutiva (AND) posição <i>edgewise</i>	113
Tabela 49. Dados para a densidade	114
Tabela 50. Dados para a absorção de água.....	115
Tabela 51. Dados para o inchamento em espessura	116
Tabela 52. Dados para a taxa de não-retorno em espessura	117
Tabela 53. Dados para a perda de massa em podridão branca e parda.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Distribuição geográfica natural da espécie <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.....	04
Figura 02. Distribuição geográfica natural da espécie <i>Pinus kesiya</i> Royle ex Gordon.....	06
Figura 03. Desenvolvimento de mercado dos compostos estruturais de madeira (LVL, LSL e OSB).	07
Figura 04. Diagrama das etapas de produção contínua de LVL.....	11
Figura 05. Exemplos da principal utilização dos painéis LVLs	13
Figura 06. Eixos cartesianos “x”, ”y” e “z” observados em um painel LVL.	15
Figura 07. Mecanismo de inchamento em espessura de painéis de madeira.....	23
Figura 08. Equipamento de avaliação não-destrutiva <i>Stress Wave Timer 239 A</i> da marca <i>Metriguard</i>	27
Figura 09. Comportamento da temperatura na face, contra-face e miolo durante o processo de prensagem à quente de painéis LVLs de <i>Pinus caribaea</i>	29
Figura 10. Diferenças na velocidade de propagação das ondas de tensão em painéis LVLs	30
Figura 11. Comportamento da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) frente à variação do teor de umidade.....	30
Figura 12. Comportamento da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) frente à variação de umidade em painéis compensados, OSB e aglomerados	32
Figura 13. Processos de confecção dos painéis LVLs.....	42
Figura 14. Exemplo esquemático da determinação do tempo de trânsito (t) da onda de tensão nas vigas de LVL	44
Figura 15. Esquema proposto para o ensaio de flexão estática	45
Figura 16. Realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras	47
Figura 17. Tipos de rupturas descritos na norma ASTM D 4761-96	48
Figura 18. Corpos-de-prova para os ensaios de cisalhamentos	49
Figura 19. Equipamentos para determinação das propriedades físicas	50
Figura 20. Processo de aferição das dimensões e de lixamento dos corpos-de-prova	52
Figura 21. Corpos-de-prova utilizados para o ensaio de biodeterioração	53
Figura 22. Frascos de vidros utilizados para inoculação dos fungos.....	55
Figura 23. Valores do módulo de elasticidade (E_m) e do módulo de ruptura (f_m) nas duas posições de ensaio <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	58
Figura 24. Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$)	61
Figura 25. Padrão de ruptura observado para painéis LVLs de <i>Pinus oocarpa</i> e <i>Pinus kesiya</i> em ensaio de compressão paralela às fibras	62
Figura 26. Valores médios da resistência ao cisalhamento paralelo ($f_{gv,0}$) e perpendicular ($f_{gv,90}$) às linhas de cola	64
Figura 27. Análise da ruptura em cisalhamento paralelo à linha de cola	64
Figura 28. Médias da velocidade de propagação das ondas de tensão V_0 (m/s)	66
Figura 29. Médias do módulo de elasticidade dinâmico E_{md} (N/mm ²)	67
Figura 30. Médias agrupadas da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0 - m/s).....	68
Figura 31. Médias agrupadas do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md} – N/mm ²)	69

Figura 32. Comportamento da média da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0 - m/s) para as posições <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	70
Figura 33. Comportamento da média do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md} – N/mm ²) para as posições <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	71
Figura 34. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}).....	71
Figura 35. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}).....	72
Figura 36. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0).....	73
Figura 37. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0).....	73
Figura 38. Valores médios da absorção de água (ABS).....	75
Figura 39. Valores médios do inchamento em espessura (IE)	76
Figura 40. Gradiente vertical de densidade em painéis LVLs.....	79
Figura 41. Exemplo de corpo-de-prova (CP) da espécie de referência <i>Pinus</i> spp. após a biodeterioração por um período de 12 semanas	81
Figura 42. Valores médios da perda de massa (%) em podridão branca e parda.....	82
Figura 43. Defeitos causados pelo ensaio de biodeterioração observados na porção inferior dos corpos-de-prova de LVL.....	83
Figura 44. Exemplo do aspecto visual pós biodeterioração causada pelo fungo de podridão branca e parda.....	84
Figura 45. Vista lateral de um corpo-de-prova de LVL (CP) após o ataque do fungo <i>Gloeophyllum trabeum</i>	85

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABS	- Absorção de Água (%)
AND	- Avaliação Não-Destrutiva
ASTM	- American society for testing and materials
CP	- Corpo-de-prova
EFL	- Departamento de Engenharia Florestal
E_m	- Módulo de Elasticidade
E_{md}	- Módulo de Elasticidade Dinâmico
ESALQ	- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Piracicaba/SP
EWP	- <i>Engineering Wood Products</i>
$f_{c,0}$	- Resistência à Compressão Paralela
f_m	- Módulo de Ruptura
FT	- Faculdade de Tecnologia
$f_{v,0}$	- Resistência ao Cisalhamento Paralelo
$f_{v,90}$	- Resistência ao Cisalhamento Perpendicular
g/cm ³	- Unidade de Medida para Densidade
g/m ²	- Unidade de Medida para Gramatura de Adesivo
Glulam	- <i>Glued Laminated Timber</i>
IE	- Inchamento em Espessura (%)
LSL	- <i>Laminated Strand lumber</i>
LVL	- <i>Laminated Veneer lumber</i>
MDF	- <i>Medium Density Fiberboard</i>
MLC	- Madeira Laminada Colada
MOBOT	- <i>Missouri Botanical Garden</i>
MPa	- Unidade de Medida para as Propriedades Mecânicas
N/mm ²	- Unidade de Medida para as Propriedades Mecânicas
NDE	- <i>Non Destructive Evaluation</i>
NDT	- <i>Non Destructive Thecnics</i>
OSB	- <i>Oriented Strand board</i>
OSL	- <i>Oriented Strand lumber</i>
PEM	- Produtos Engenheirados de Madeira
PK	- <i>Pinus kesiya</i>
PLP	- Painele Estrutural de Lâminas Paralelas
PM	- Perda de Massa (%)
PO	- <i>Pinus oocarpa</i>
PSL	- <i>Parallel Strand Lumber</i>
SCL	- <i>Structural Composite Lumber</i>
TNRE	- Taxa de Não-Retorno (%)
UnB	- Universidade de Brasília
USP	- Universidade de São Paulo

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de lâminas paralelas (PLP) ou *laminated veneer lumber* (LVL), são painéis estruturais confeccionados a partir de lâminas de madeira coladas juntas na mesma direção de suas fibras, ou seja, com a concepção tecnológica diferente dos compensados, onde as lâminas são coladas perpendicularmente umas às outras. O estudo sobre LVL começou na década de 40, quando se propôs colar lâminas de madeira no mesmo sentido de suas fibras para a confecção de elementos estruturais de aviões (LUXFORD, 1944 citado por SCHAFFER et al. 1972).

Com o desenvolvimento tecnológico, as estruturas em madeira foram aprimoradas, aumentando-se os vãos para um maior aproveitamento de espaço interno. Desta forma, as peças de madeira maciça para resistirem a tais modificações, deveriam ser de dimensões cada vez maiores. Isto fez com que aumentasse a demanda por materiais estruturais, aumentando-se assim, a pressão sobre as florestas nativas, de onde ainda é obtido material para este fim. Neste contexto, o LVL surgiu como uma alternativa à madeira sólida, em uma época onde a grande demanda por madeira tem causado um dramático decréscimo de recursos florestais (AYDIN et al. 2004). Portanto, os LVLs, como são mundialmente conhecidos, constituem um produto da nova geração dos derivados de madeira com grande potencial para substituir madeira de espécies nativas onde a utilização principal se dá por peças estruturais na construção civil.

Apesar de já concretizado no mercado internacional como um produto de grande aceitação e grande valor, principalmente nos países da América do Norte, no Brasil ainda não existem indústrias de LVL, embora algumas destas peças já estejam sendo produzidas em escala laboratorial nas instituições de pesquisa (CARVALHO et al. 2004). No Brasil, as pesquisas têm sido desenvolvidas visando avaliar a adequação de matéria-prima oriunda de reflorestamento, onde se notam os trabalhos de MATOS (1997) com espécies do gênero *Pinus*, CARVALHO et al. (2004) e PIO (2002) que estudaram espécies de *Eucalyptus*.

Os painéis LVLs são muito utilizados para os flanges de vigas de seção “I” para estruturas de pisos (ECKELMAN, 1993; CARVALHO et al. 2004). Neste tipo de solicitação, faz-se necessário conhecer as propriedades de rigidez e resistência dos painéis LVLs. Segundo PIO (2002), na prática, quando se conhece as propriedades de

resistência e rigidez de painéis LVLs, estas propriedades se tornam indicadores de qualidade do produto considerado.

Ainda, a pesquisa sobre as avaliações não-destrutivas em produtos à base de madeira é muito desenvolvida, já internacionalmente consolidada e de caráter industrial. Estas pesquisas se desenvolveram para o controle de qualidade de vários produtos, entre eles os cerâmicos, metalúrgicos e plásticos; evitando-se assim “vazios” ou grumos de compostos dentro do produto final.

No ramo das ciências florestais, as avaliações não-destrutivas já são utilizadas para a verificação de peças estruturais, classificando-as e permitindo uma melhor aplicação das peças. Uma série de vantagens está relacionada à utilização das avaliações não-destrutivas, entre elas a manutenção da integridade estrutural da madeira, ou seja, não sendo necessária a retirada de corpos-de-prova para a realização de ensaios em laboratório, na determinação das propriedades mecânicas (OLIVEIRA e SALES, 2002) sendo, portanto mais rápidas, práticas e bastante eficientes.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal, avaliar a produção de painéis LVLs, a partir de duas espécies de madeira do gênero *Pinus* (*Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*).

Como objetivos específicos, determinar-se-ão as propriedades mecânicas, físicas e resistência ao ataque biológico dos painéis confeccionados e verificar-se-á a viabilidade da utilização de uma técnica não-destrutiva para determinar as propriedades mecânicas dos painéis LVLs das duas espécies.

2. HIPÓTESES

1. Existe diferença entre as propriedades físicas, mecânicas e de resistência ao ataque de fungos apodrecedores nos painéis LVLs quando confeccionados com madeira de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, sendo possível definir uma espécie de madeira do gênero *Pinus* mais adequada, a partir deste ponto de vista para a confecção de painéis LVLs.
2. É possível estimar adequadamente as propriedades de resistência e rigidez mecânica dos painéis LVLs por metodologias não-destrutivas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O GÊNERO *Pinus*

O gênero *Pinus* consiste de mais de 100 espécies e é pertencente à família *Pinaceae*, ordem *Coniferae* e subdivisão *Gymnospermae* (MIROV, 1967). Nos últimos anos a utilização de *Pinus* na indústria madeireira brasileira tem sido crescente. As estimativas indicam que 35% do volume de madeira serrada produzida é formado de madeira desse gênero e no país existem, aproximadamente, 1,5 milhões de hectares de plantações. Portanto, trata-se de espécies fundamentais para o fornecimento de matéria-prima, com destaque para as Regiões Sul e Sudeste (BALLARIN e PALMA, 2003).

3.1.1. *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltldl.

Também conhecido como *Ocote Pine*, *Nicaraguan Pich Pine* e *Pino Blanco*, a espécie *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltldl é uma espécie muito variável e largamente distribuída, crescendo naturalmente desde Sonora e Chihuahua (no México) até a América Central, sendo encontrada em altitudes variando de 900 a 2400m. Na América Central a distribuição espacial desta espécie passa através da Guatemala e Honduras até a Nicarágua. São encontradas também nas montanhas no interior das Honduras Britânicas (STANLEY e RECORD, 1936 citado por por MIROV, 1967) a 900m. Podem ser naturalmente observados também em El Salvador e sul do México. Ainda, são observados indivíduos desta espécie no Nordeste de San Salvador, próximos a fronteira de Honduran, à 650 – 1500 m (Fig. 01).

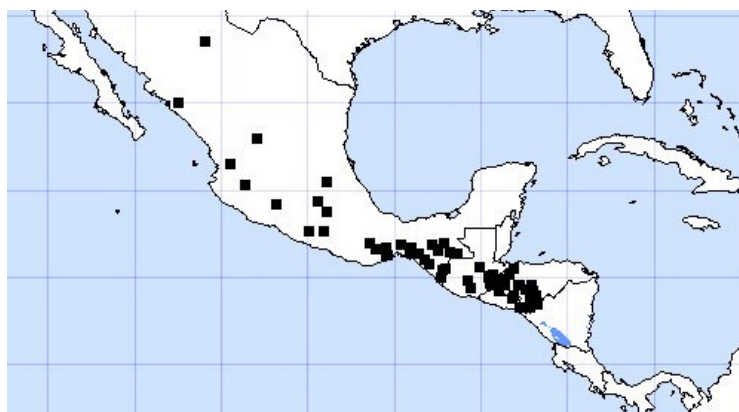


Figura 01. Distribuição geográfica natural da espécie *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltldl.
Fonte: Mobot.org.

Desenvolvem-se em solos muito diversos, como arenosos, francos ou argilosos. Segundo LAMPRECHT (1990), as árvores desta espécie, freqüentemente alcançam alturas entre 20 e 30 m, podendo chegar à 35 m e DAP variando entre 40-70 cm. A forma do tronco é muito variável devido às diversas variedades, apresentando copa pouco simétrica, com galhos finos e relativamente ralos. A casca é fendida e freqüentemente escamosa na parte superior do tronco.

A madeira desta espécie tem densidade entre 0,45 e 0,60 g/cm³ e permite-se a impregnação e operações com serras, lixas, etc. Pode ser utilizada como tábuas para construções leves, caixas, entre outras utilizações. Dotada de fibra longa, também é apropriada para produção de celulose e papel, também podendo aproveitar a resina (LAMPRECHT, 1990).

3.1.2. *Pinus kesiya* Royle ex Gordon

Segundo STYLES et al. (1972) e STYLES (1979) citado por LAMPRECHT (1990), a correta identificação para as três espécies, *Pinus insularis*, *Pinus khasya* e *Pinus yunnanensis*, é a espécie *Pinus kesiya* Royle ex Gordon, também conhecida como *Khasi pine*, *Benguet pine* ou *Tinyu*.

Esta espécie tem distribuição natural nas montanhas dos estados indianos Khani a oeste e sul da grande curva do rio Brahmaputra passando pelas montanhas Naga de Assam e mais ao longe, pelo sudeste, em Sikang e Yunnan. Também se estende pelo Nordeste da Tailândia, pela fronteira de Burmese, ocorrendo em pequenas regiões e na maioria das vezes, sendo observada com outras espécies. Geralmente, no nordeste da Tailândia e no Laos, esta espécie cresce somente em pequenas porções e em poucas localidades, em altitudes normalmente entre 1200 e 1400 m. Em outros países, como o Vietnam, esta espécie ocupa regiões montanhosas em altitudes de 600 – 1800 m (Fig. 02).

As árvores desta espécie atingem 30m de altura, DAP de 120cm, casca marrom-acinzentada, se apresentado profundamente sulcadas. As copas são longas e densas (árvores jovens) e arredondadas e achatadas (árvores adultas). Naturalmente são adaptadas em diversos substratos, desde os mais arenosos aos mais argilosos. A madeira é bastante resinosa, se aproximando da espécie *Pinus caribaea*, e apresenta densidade entre 0,45 – 0,70 g/cm³, onde é considerada de fácil processamento mecânico ou

manual, para as diversas atividades de corte e acabamento. Possui utilizações semelhantes à de *P. oocarpa* (LAMPRECHT, 1990).

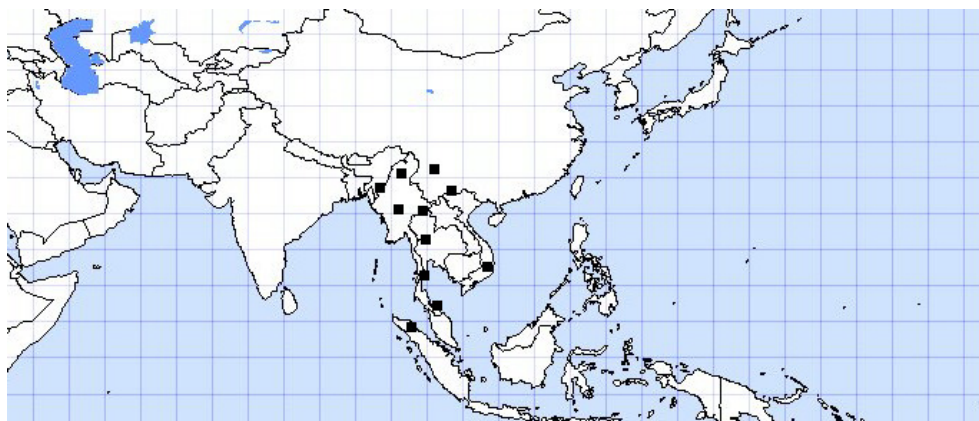


Figura 02. Distribuição geográfica natural da espécie *Pinus kesiya* Royle ex Gordon.
Fonte: Mobot.org.

3.2. COMPOSTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

A técnica de utilização de adesivos para a união de superfícies é bastante antiga, datando do Egito Antigo, mas ganhou um maior desenvolvimento tecnológico em meados de 1900 com o surgimento de resinas preparadas sinteticamente. Atualmente a técnica de colagem é utilizada como alternativa às técnicas convencionais de pregos, rebites, tarugos, entre outros (POCIUS, 2002).

Dentro deste contexto, os compostos estruturais de madeira, tradução do inglês *structural composite lumber* (SCL), são por definição, pequenas partes de madeira, coladas para formar produtos (painéis estruturais) de tamanhos próximos aos da madeira sólida convencional, de alta resistência e normalmente usando-se adesivos resistentes à água. Dentre as utilizações mais usuais, incluem-se os painéis estruturais colados formados a partir de lâminas (*laminated veneer lumber* - PLP ou LVL) e os painéis de partículas laminadas (*laminated strand lumber* – LSL; *oriented strand lumber* – OSL; e *parallel strand lumber* – PSL) (EMISSION FACTOR INDUSTRY, 2002).

O mais importante na concepção tecnológica é que estes painéis estruturais combinam as propriedades de resistência natural da madeira com as modernas técnicas de engenharia e produção para criar produtos estruturais eficientes utilizando-se fontes de recursos diferentes (resíduos industriais, melhor aproveitamento de matéria-prima,

etc.). São produzidos a partir de uma variedade de matérias-primas, que variam de dimensão, forma, etc. (BOWER et al. 2003).

Portanto, devido a estas vantagens dos SCL, tais produtos vêm ganhando uma maior projeção no mercado, enquanto que outros produtos mais convencionais como a madeira serrada vêm sendo substituídos (ADAIR, 2006) (Fig. 03).

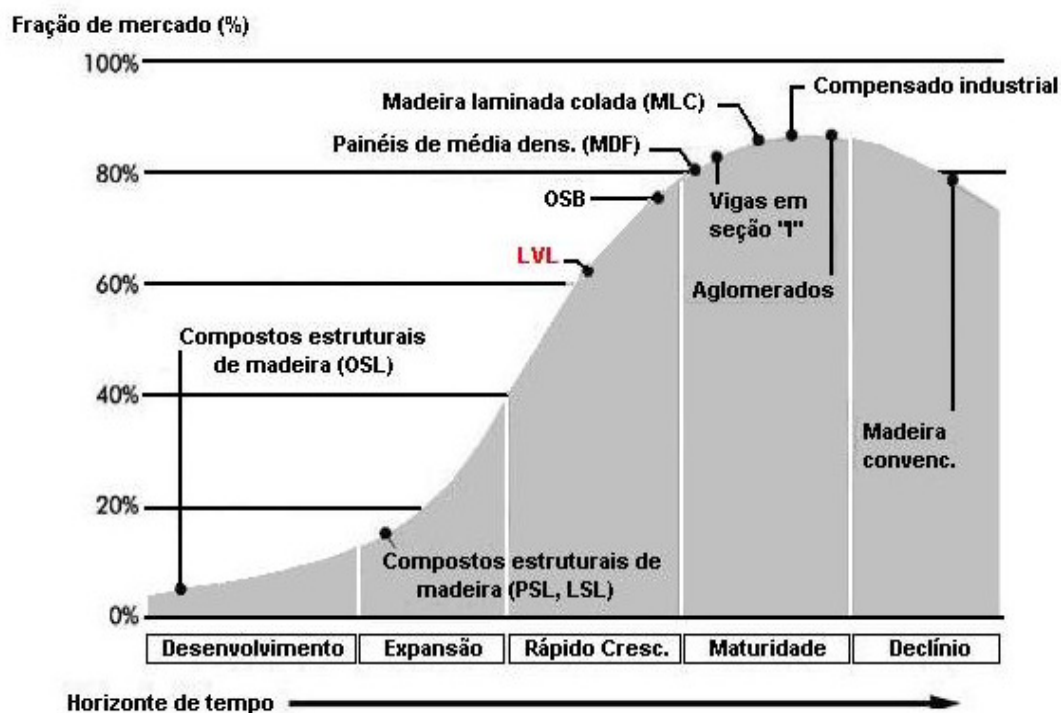


Figura 03. Desenvolvimento de mercado dos compostos estruturais de madeira (LVL, LSL e OSL). Fonte: Adair, 2006.

De acordo com SCHUKLA e KAMDEN (2008), o objetivo da tecnologia de compostos estruturais de madeira é confeccionar novos painéis com qualidade aceitável (dentro das especificações das normas internacionais) usando-se matéria-prima de diversas classes de qualidade, combinando-se as propriedades vantajosas de cada constituinte.

Segundo PIO (2002), estas peças coladas, os SCL, apresentam boas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e de ruptura), grande resistência, baixo coeficiente de expansão e condutividade térmica, grande disponibilidade de matéria-prima, linha de cola resistente devido ao aprimoramento da tecnologia de adesivos, liberdade de formas e tamanhos. Ainda, MATSUNAGA (1995) citado por PIO (2002), afirma que o dimensionamento estrutural utilizando-se de SCL é mais preciso, proporcionando

economias no projeto, melhor controle de umidade das peças e, o peso total da estrutura é mais leve.

Para a confecção dos SCL, algumas características da matéria-prima limitam a sua utilização. Para tanto, a massa específica das espécies de madeiras que forem muito baixa, vão produzir lâminas felpudas, de difícil acabamento e que irão interferir negativamente nos processos de colagem. Por outro lado, espécies com massa específica alta, produzirão lâminas muito quebradiças além de consumirem muita energia para processá-las (PIO, 2002).

Na América do Norte, a faixa considerada ideal de massa específica para a confecção de lâminas para os SCL está entre 0,32 – 0,65 g/cm³. No caso dos painéis LVLs, são mais utilizadas lâminas com densidades entre 0,48 e 0,59 g/cm³, obtidas das espécies *Pinus taeda*, *P. elliotii*, *P. palustris*, *P. echinata* (USDA, 1999).

3.3. ADESIVOS ESTRUTURAIS: A RESINA FENOL - FORMALDEÍDO

Adesivos estruturais podem ser definidos como materiais usados para colar outros materiais de alta resistência, como a madeira, partículas ou metal; onde a resistência da linha de cola deve exceder a 6,9 MPa; em condições normais de temperatura, pressão e umidade (POCIUS, 2002).

O adesivo é a parte vital para a confecção dos compostos estruturais a base de madeira, ou seja, a linha de cola formada deve ter resistência suficiente para transferência de tensões entre as lâminas durante a utilização do painel (BALDWIN, 1981; SELLERS, 1985).

Por outro lado, para se conseguir uma boa linha de cola, utiliza-se uma quantidade muito grande de adesivo, conseqüentemente o custo de produção do SCL em termos de adesivo, pode chegar a até 32% do custo total de confecção do painel estrutural (SELLERS, 2001). O custo de tais resinas é alto devido a dois principais fatores: primeiro, altos investimentos em capital são destinados para obter tecnologia, maquinário e mão-de-obra especializados para o processamento das matérias-primas e para a confecção da resina; segundo, a crescente demanda por SCL fez com que aumentasse a demanda por resinas estruturais e conseqüentemente, fazendo com que os preços destes adesivos continuassem a aumentar (SELLERS, 2001).

Entretanto, o problema do adesivo como fator limitante da produção em escala industrial de compostos a base de madeira, vem sendo contornado com o desenvolvimento de adesivos alternativos (RENZO, 2008) assim como os maquinários de indústrias de compensados podem ser facilmente adaptados para a montagem de painéis LVLs (GABRIEL, 2007).

Embora seja alto o custo de obtenção destas resinas estruturais, como o fenol-formaldeído ou resorcinol-formaldeído, as vantagens em qualidade que são obtidas para o produto final utilizando estes adesivos, são muito superiores aos custos iniciais.

MOSLEMI (1974) e SKEIST (1990) citados por SANTOS et al. (2003), revelam que entre os adesivos mais usuais, destacam-se os fenólicos, por apresentarem propriedades como alta resistência à umidade, durabilidade e resistência ao ataque de microrganismos, possibilitando, portanto, produtos colados mais duráveis.

De acordo SELLERS (2001), durante o ano de 1998 na América do Norte, as resinas formuladas com fenol-formaldeído foram as mais utilizadas nas indústrias de compensados e LVL e que juntas representam 36% do mercado total de produtos à base de madeira, chegando à marca de 18.695 milhões de m³ destes produtos, naquele ano. Ainda, estes dois setores industriais, de madeira compensada e LVL, consumiram juntos 273 kilotoneladas (kt) de resina bruta, a base de fenol-formaldeído.

O uso de fenol-formaldeído (FF) como resina foi observado primeiramente por BAYER no começo de 1872 e tornou-se industrialmente aplicável somente em 1909 com os estudos de BAEKELAND (1910; 1912) citados por KOLLMANN et al. (1975). Somente em meados de 1935, as resinas fenólicas vieram a ser utilizadas comercialmente e tiveram um desenvolvimento muito grande na 2ª Guerra Mundial.

Segundo PROVDER (1989) citado por PEDROSA (2003) a resina fenólica é largamente utilizada como adesivo termo-estável em produtos a base de madeira para uso exterior (Fig. 04). Esta é a grande vantagem desta resina, ou seja, apesar das variações de temperatura e umidade diárias, o adesivo sofrerá pouca influência do meio externo.

Segundo PHINNEY (1950) citado por KOLLMANN et al. (1975), espera-se que utilizando este tipo de resina sintética, não haja delaminação no painel confeccionado mesmo com a longa exposição à água quente ou fria e com variações bruscas de temperatura agindo permanentemente ou em ciclos. Também, segundo este autor,

espera-se que não haja delaminação frente ao ataque por bactérias, fungos e cupins, assim como na exposição a muitos compostos químicos, como óleos, álcalis e preservativos de madeira, incluindo retardantes de fogo.

O peso molecular desta resina é razoavelmente alto e se estabiliza na superfície da madeira, desenvolvendo uma ligação resistente a água, durável, rígida e forte. O processo de cura desta resina se dá pelo processo de polimerização, ramificação da cadeia e ligações cruzadas (*crosslinking*), o que finalmente resulta numa rede tridimensional de peso molecular tendendo ao infinito (KOLLMANN et al. 1975).

Ainda segundo este autor, durante a prensagem a quente, a resina sofre uma reação de polimerização e ligações químicas com a madeira. Dentro de certos limites, de modo geral, um aumento na temperatura de prensagem, leva a um aumento na resistência da ligação. Entretanto, as resinas FF possuem cura mais lenta do que as resinas uréia-formaldeído (UF) e requerem uma temperatura de prensagem mais elevada.

3.4. O PAINEL DE LÂMINAS PARALELAS (LVL)

Os LVL são materiais estruturais engenheirados confeccionados com madeira laminada de espessura variando entre 0,3 – 6,3 mm (SELLERS, 1985) e a direção de cada lâmina deve ser paralela umas as outras, no sentido do seu comprimento. São unidas por um adesivo estrutural com a intenção de formar outro produto, sólido, com seções definidas e o comprimento do painel limitado somente pelo processo de confecção ou do transporte do produto final (CARVALHO et al. 2004).

Em painéis LVLs as lâminas são sempre orientadas na mesma direção, o número destas pode ser superior a 20, a sua espessura pode variar entre 2,5 mm até 12,7 mm e as dimensões do painel produzido, podem ser maiores que 70 mm de espessura e mais que 20 metros de comprimento, além da utilização prioritariamente estrutural (CARVALHO et al. 2004). De acordo com MARRA (1992) citado por PEDROSA (2003), estes produtos possuem dimensões e características definidas em função de suas aplicações finais. O balanço estrutural do produto é conferido através da ligação adesiva entre os elementos de madeira, sua distribuição e orientação na estrutura do composto.

3.4.1. Processo de produção industrial

De acordo com EMISSION FACTOR INDUSTRY (2002), o processo de fabricação de painéis de lâminas paralelas (LVL) é relativamente complexo, envolvendo muitas operações, mas resultam em um produto bastante uniforme e resistente (Fig. 04).

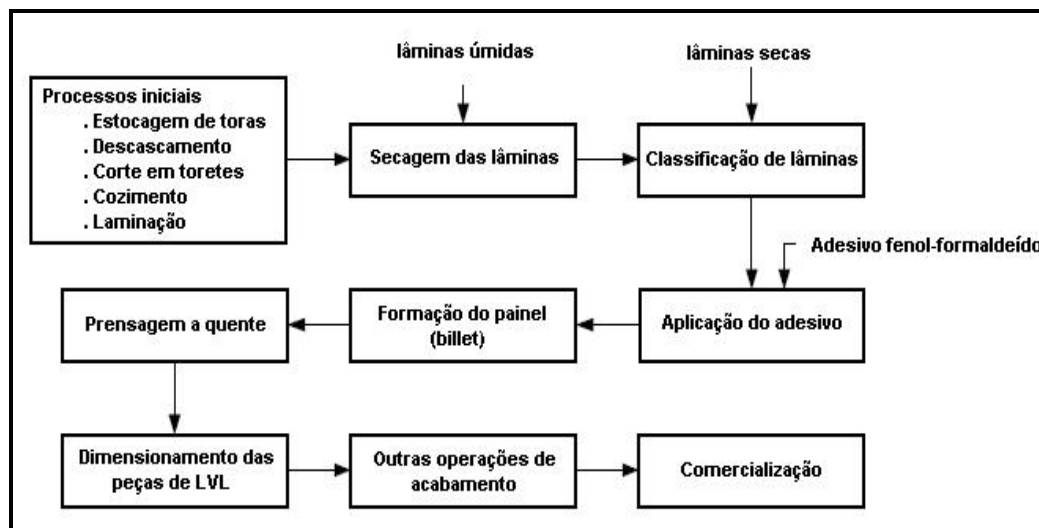


Figura 04. Diagrama das etapas de produção contínua de LVL. Fonte: adaptado de EMISSION FACTOR INDUSTRY (2002).

Os procedimentos iniciais relacionam-se ao tratamento da tora de madeira provinda da colheita florestal. Esta deve ser descascada, cortada em pequenas toras para o dimensionamento das lâminas, cozidas em tanques com vapor ou água fervente e por fim, são obtidas as lâminas em torno laminador.

A obtenção das lâminas, o processo e instalações para a secagem e o manuseio das lâminas em uma indústria de LVL é bastante semelhante às indústrias de compensados (WALTERS, 1996), embora a secagem deva ser realizada até a um teor de umidade de 10% ou inferior (não menor que 6%), evitando assim problemas de delaminações e bolhas. A este teor de umidade, as lâminas ficam mais quebradiças, devendo ser manuseadas cuidadosamente, pois não deve haver falhas entre lâminas completas, na formação de um painel.

O passo seguinte é o sistema de classificação das lâminas em classes de resistências (ou classes de qualidade), onde algumas indústrias possuem tecnologia de classificação por meio de ultra-som ou por meio de propagação de ondas de tensão. Normalmente as lâminas de menor rigidez são posicionadas na parte interna (“miolos”) dos painéis de LVL e as de maior rigidez nas faces.

As lâminas secas e classificadas passam pelos aplicadores de adesivos e dispostas umas sobre as outras no mesmo sentido das fibras, para a confecção dos painéis de LVL. Normalmente os painéis são confeccionados com espessura de 2 a 9,5 cm, largura de 61 a 280 cm e comprimento muito variável, de até 24 metros (WALTERS, 1996).

Os painéis formados são prensados em altas pressões e temperaturas por um período suficiente para a cura do adesivo e, após a liberação da prensa, estes são resfriados a temperatura ambiente e cortados de acordo com o dimensionamento pretendido (WANG et al. 2003). Por fim, outras operações são realizadas, no sentido do acabamento das peças produzidas, como o lixamento.

3.4.2. Vantagens comparativas

Os produtos em painéis de madeira normalmente apresentam uma série de vantagens sobre a madeira sólida convencional, incluindo o aumento na estabilidade dimensional, uniformidade nas propriedades mecânicas do produto final, possibilidade de produção em grandes dimensões, reduções no custo de produção, visual do produto agradável, facilidade em moldar o produto conforme desejado, entre outras (SHUKLA et al. 1999 e KILLIC et al. 2006).

No caso dos painéis LVLs, estas vantagens também são observadas. Por exemplo, para a confecção deste tipo de painel, podem-se utilizar toras de menores dimensões para a laminação e ter um melhor aproveitamento de madeiras de baixa qualidade, geralmente as de baixa resistência mecânica (ex: madeiras de rápido crescimento: *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp.) (BOHLEN, 1972). Ainda, pode-se reduzir os prejuízos causados por defeitos da madeira (nós de grandes dimensões, fendas) pela retirada de lâminas defeituosas, classificadas visualmente, otimizando a resistência final da peça.

Além da retirada de lâminas defeituosas, para o maior aproveitamento do material na confecção de LVL, segundo KIMBALL (1968) citado por PIO (2002), pode-se distribuí-las na peça de LVL sem que haja grandes perdas em resistência mecânica no produto final. Isto é possível devido à utilização da laminação que diminui a intensidade do efeito negativo que os nós ou outros defeitos causam às propriedades mecânicas, como o desvio de grã e descontinuidade de tecidos.

Desta forma, o processamento destas em produtos engenheirados, como os LVL, aparecem como uma oportunidade de produção com grandes dimensões de produtos parecidos com madeira serrada, de alta resistência (WANG et al. 2003). Do ponto de vista estrutural, a confecção do painel LVL permite a formação de um material engenheirado; mais uniforme na resistência e densidade e exibindo uma estabilidade dimensional maior que madeira serrada provindas de toras semelhantes (BOHLEN, 1972).

3.4.3. Principais usos

O LVL é um produto de muita versatilidade, podendo ser o substituto para muitas peças de madeiras convencionais, em usos estruturais, externos e de interiores, acabamentos, mobília, entre outras utilizações. Alguns dos usos são: paredes estruturais ou não estruturais, batentes de portas e janelas, corrimãos, degraus de escada, pisos, estruturas de telhados, tampos de mesas, estruturas de móveis em geral (ECKELMAN, 1993; CARVALHO et al. 2004)

Mundialmente, a principal utilização dos painéis LVLs é para os flanges de vigas de seção “I” (Fig. 05) muito utilizadas em estruturas de pisos (ECKELMAN, 1993; CARVALHO et al. 2004).



Figura 05. Exemplos da principal utilização dos painéis LVLs em flanges de vigas em seção “I” para estruturas de pisos. Fonte: Pedrosa, 2003.

Os LVLs também são utilizados para a construção de pontes. Isto é possível graças à tecnologia de adesivos que desenvolveu resinas resistentes à umidade e aos tratamentos preservativos das peças de LVL, onde a sua estrutura formada por lâminas

de madeira facilita a penetração da solução preservativa. Por exemplo, em 1993 no oeste dos Estados Unidos, já haviam sido construídas mais de 20 pontes utilizando painéis LVLs. Os vãos das pontes variam entre 7,3 a 15,2 metros e a largura destas varia entre 3 e 11m (RITTER et al. 1996).

Para a utilização em mobílias, em vários utensílios os LVL podem ser utilizados. Segundo ECKELMAN (1993), mesas, interior de sofás, cadeiras, armários de cozinha, prateleiras e estantes de livros, camas e outras peças de estruturas de móveis mais complexos podem ter suas peças de madeira sólida convencionais, substituídas por peças de LVL.

Na América do norte, 45% do LVL produzido é utilizado na fabricação de vigas I, para sustentação de pisos (CARVALHO e LAHR, 2003) e sem dúvida, este é o principal segmento para a utilização deste material. Segundo JANOWIAK e BUKOWSKI (2000), as pesquisas também caminham para a utilização de LVL como matéria-prima para a confecção de tacos de *baseball*, em substituição à madeira sólida.

3.4.4. Propriedades mecânicas e fatores influentes

Dentre os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas nos painéis LVLs, destacam-se: os tipos e as propriedades dos adesivos, a espécie de madeira, etapas de produção e o eixo estrutural quando analisadas de forma estática.

Assim, os aspectos industriais (etapas de produção) interferem nas propriedades mecânicas a partir da variação do número de lâminas, a espessura das lâminas, os tipos e qualidade da junção entre lâminas para grandes painéis, o tipo e regulagem dos aplicadores de cola, temperatura/pressão/tempo de prensagem, entre outros (PALMA et al., 2008; CARVALHO et al., 2004; PIO, 2002); as propriedades do adesivo na viscosidade, pH, teor de sólidos de resina, densidade, umidade (POCIUS, 2002; SELLERS, 1985; KOLLMANN, 1975) e as propriedades da espécie de madeira utilizada, entre elas o teor de umidade da madeira, a densidade da madeira, porcentagens de lenho juvenil/adulto/tardio, entre outros (SELLERS, 1985; BOOTLE, 1983; KOEHLER, 1924).

3.4.4.1 Efeito do eixo estrutural na análise estática

Segundo a norma ASTM D 5456-06 (ASTM, 2006) os compostos estruturais de madeira (LVL, LSL e OSB) devem ser avaliados para as duas possíveis posições: *flatwise* e *edgewise* (Fig. 06), ou como também são determinadas pelo arranjo das lâminas em relação ao modo de ensaio, de menor e maior inércia, respectivamente (GABRIEL et al. 2008; PALMA et al. 2008a; PALMA et al. 2008b).

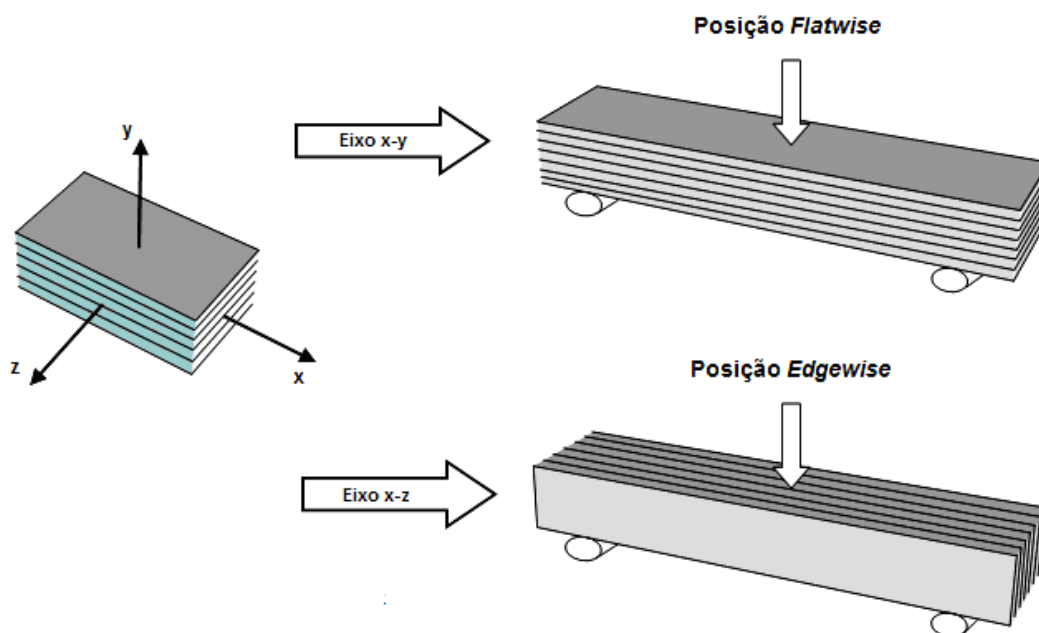


Figura 6. Eixos cartesianos “x”, “y” e “z” observados em um painel LVL, para fins de orientação nos ensaios mecânicos. Nos eixos “x” e “y” tem-se a posição *flatwise* e para os eixos “x” e “z” tem-se a posição *edgewise*. Fonte: adaptado de ASTM, 2006 e CARVALHO et al. 2004.

PALMA et al. (2008) verificaram que em painéis LVLs heterogêneos, compostos por lâminas de madeira das espécies *Pinus oocarpa* e *Pinus caribaea* (var. *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*) de 3,4 mm de espessura e aderidos por adesivo à base de fenol-formaldeído, o arranjo totalmente paralelo com 17 lâminas apresenta o módulo de elasticidade em flexão estática (E_m) para a posição *flatwise* (8912 N/mm²) superior à posição de ensaio *edgewise* (7369 N/mm²).

Ainda segundo tais autores, observou-se que o módulo de ruptura em flexão estática (f_m) é superior em *flatwise* para a formação do painel com 13, 15 ou 17 lâminas

(59,33; 63,86 e 56,64 N/mm² respectivamente) à posição *edgewise* com o mesmo número de lâminas (54,68; 42,19 e 51,21 N/mm² respectivamente).

Estas diferenças dos valores do módulo de elasticidade (E_m) e do módulo de ruptura (f_m) em flexão estática entre as posições *flatwise* e *edgewise* de acordo com CARVALHO et al. (2004) são devido ao processo de confecção dos painéis LVLs, onde a prensagem a altas temperaturas e altas pressões para a cura do adesivo e união das lâminas de madeira, causam uma certa densificação nas camadas externas do painel (nas superfícies) aumentando a rigidez destas porções. Por outro lado, nas camadas mais internas (miolo), a densidade do material não é muito alterada pela ação do calor.

Ainda segundo CARVALHO et al. (2004), estudando painéis LVLs confeccionados com o híbrido de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* consolidados com fenol-formaldeído, verificaram que para o E_m em flexão estática, a posição *flatwise* é superior à posição *edgewise* (13792 e 12917 N/mm² respectivamente). O mesmo comportamento é observado para o f_m , onde a posição *flatwise* mostrou-se com 59 N/mm² e a posição *edgewise* com 55 N/mm².

3.4.4.2. Efeito do tipo de adesivo

No processo de confecção de painéis de lâminas paralelas (LVL) o adesivo é o responsável pela transferência de tensões entre as lâminas de madeira, conferindo ao painel resistência mecânica frente às diferentes solicitações (flexão, compressão, cisalhamento, entre outras) (TSOUMIS, 1991). Desta forma, o adesivo tem papel decisivo na qualidade do painel confeccionado.

AYDIN et al. (2004) verificaram a influência do adesivo em painéis LVLs de 12 camadas confeccionados com lâminas de *Eucalyptus camaldulensis* com 1,6 mm de espessura. Para tanto, foram testados os adesivos uréia-formaldeído (UF) e polivinilacetato (PVA), a gramatura de 180 g/m². Os resultados deste estudo mostraram que de fato os adesivos têm influência significativa na qualidade do painel, frente às suas propriedades mecânicas. Assim, avaliando-se o E_m , os painéis LVLs com adesivo UF, se mostraram com 9411,2 N/mm² e com o adesivo PVA, com 8989,6 N/mm².

Ainda com relação a este estudo, outras propriedades foram afetadas pela diferença entre os adesivos. O módulo de ruptura em flexão estática (f_m) observado para UF foi de 94,9 N/mm² enquanto que observou-se 90,5 N/mm² para o adesivo PVA.

Quanto à resistência à compressão paralela no sentido paralelo às fibras, observou-se o valor de 51,7 N/mm² para UF e 47,1 N/mm² para PVA. Todos os valores anteriormente citados, segundo este estudo, são significativos à 1% e a diferença entre as densidades aparentes dos painéis é bastante sutil, onde observou-se 0,674 g/cm³ para o painel colado com UF e 0,635 g/cm³ em painéis com PVA.

Em um estudo semelhante, KILLIC et al. (2006), avaliando LVL confeccionado com lâminas de *Alnus glutinosa* (*Black Alder*) com espessuras de 2 e 4 mm, colados com adesivo PVA e poliuretano (PU) e gramatura de 180 e 250 g/cm² respectivamente; verificaram que o adesivo PVA que é indicado para uso interior, confere ao painel LVL melhores propriedades mecânicas que utilizando-se o adesivo PU. Para o E_m , observou-se 10608,2 N/mm² com adesivo PVA e 8647,1 N/mm² para PU. Já para a resistência à compressão paralela, observou-se o valor de 54,12 N/mm² para PVA e 53,62 N/mm² para PU.

Ainda, a resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola apresentou valores de 13,69 N/mm² para o painel com PVA e 11,90 N/mm² para o painel com PU (KILLIC et al. 2006).

3.4.4.3. Efeito da espécie de madeira

Avaliando-se a influência da espécie de madeira nas propriedades mecânicas de painéis LVLs, percebe-se a quantidade de variáveis inerentes à este fator. Suas propriedades anatômicas, como a quantidade e a distribuição da porosidade, variação da densidade entre os tecidos da madeira (lenho inicial/lenho tardio, lenho juvenil/lenho adulto, cerne/alburno), dimensão dos elementos celulares (espessura das paredes celulares, diâmetro do lúmen e comprimento de fibras, traqueídeos e fibrotraqueídeos); definem a influência da espécie (SELLERS, 1985).

Segundo KANTAY (2001) citado por GUNGOR et al. (2006), a porcentagem de fibra e seu comprimento são fatores que interferem nas propriedades mecânicas. Ainda, de acordo com o autor, quando ocorre um aumento no comprimento das fibras, há um aumento no E_m e no f_m . Em painéis LVLs, estas propriedades influenciam diretamente a qualidade da colagem e por conseqüência, as propriedades mecânicas (TSOUMIS, 1991).

Nesta linha, KANTAY (2001) citado por GUNGOR et al. (2006), estudando as propriedades anatômicas da madeira de *Pterocarya fraxinifolia* para a confecção de painéis compensados, observou que o diâmetro dos vasos afetam várias propriedades da madeira, inclusive favorece à uma maior porosidade quando há vasos de maiores diâmetros. Uma maior largura dos vasos facilitaria os movimentos do adesivo, no caso da penetração na madeira, aumentando a qualidade da colagem e por fim, melhorando as propriedades mecânicas (TSOUMIS, 1999 e SELLERS, 1985).

GUNGOR et al. (2006) analisaram as propriedades mecânicas de LVL confeccionados com a espécie *Pterocarya fraxinifolia*, assim como sua rugosidade. Observaram que esta espécie possui um diâmetro dos vasos nas direções radial e tangencial, muito grande. Para esta característica, quanto maiores forem os diâmetros destas células, maior será a porosidade da madeira, o que SELLERS (1985) citado por GUNGOR et al. (2006), afirma facilitar a movimentação de líquidos na madeira, facilitando, portanto, a secagem, a permeabilidade e a impregnação, ajudando também na qualidade da colagem.

De forma semelhante, vários estudos foram realizados com painéis LVLs, na verificação do efeito da espécie de madeira nas propriedades mecânicas.

Comparando-se painéis LVLs confeccionados pelo mesmo processo, com lâminas de madeira de *Fagus orientalis* (beech) e com *Eucalyptus camaldulensis* (eucalipto), AYDIN et al. (2004) verificaram que para o E_m em flexão estática, os painéis confeccionados com *beech* foram mais resistentes que os de eucalipto. Segundo estes autores, foram observados valores de 19512,2 N/mm² para *beech* e apenas 9411,2 N/mm² para eucalipto nesta propriedade. Ainda, para o f_m , os LVL com madeira de *beech* apresentaram valores médios de 118,3 N/mm² enquanto que os de eucalipto se mostraram com 94,9 N/mm².

SCHUKLA e KANDEM (2008) estudaram painéis LVLs confeccionados com *Acer saccharum* (*silver maple*), *Liriodendron tulipifera* (*yellow poplar*) e com *Populus tremuloides* (*aspen*) e verificaram a influência da espécie na produção de painéis LVLs. Desta forma, para o E_m em flexão estática, foram observados valores de 9960 N/mm² para *silver maple*, 9040 N/mm² para *yellow poplar* e 8370 N/mm² para *aspen*. Já para o f_m , os valores observados foram acima de 110 N/mm² para *maple*, próximos à 100 N/mm² para *poplar* e valores pouco acima de 100 N/mm² para *aspen*.

Contudo, a mesma espécie de madeira, *Liriodendron tulipifera* (yellow poplar) foi utilizada na confecção de painéis LVLs nos estudos de LEE et al. (1999), utilizando processo de produção semelhante ao de SCHUKLA e KANDEM (2008). Assim, naquele estudo foram fabricados painéis sem emendas de lâminas com dimensões 8,89 x 3,81 x 243,8 cm (largura x espessura x comprimento) e observou-se 14880 N/mm² e 81,47 N/mm² para suas propriedades mecânicas, E_m e f_m respectivamente.

GUNGOR et al. (2006) verificaram as propriedades mecânicas de painéis LVLs confeccionados com lâminas da espécie *Pterocarya fraxinifolia* com 2,3 mm de espessura e observaram que o E_m apresentou 9541,02 N/mm² enquanto que o f_m se mostrou com 87,81 N/mm². Segundo estes autores tais valores observados para as propriedades mecânicas são muitas vezes superiores aos LVL confeccionados com madeira de propriedades semelhantes, tais como *Populus euramericana*, *Populus tremula*, *Populus nigra* e *Alnus glutinosa*.

Na tentativa de se utilizar painéis de lâminas paralelas (LVL) em contraposição ao uso da madeira sólida, KAMALA et al. (1999) verificaram o incremento nas propriedades mecânicas, na utilização de LVL confeccionados com madeira de *Hevea brasiliensis* (seringueira). Assim, os valores do E_m foram comparados entre os painéis LVLs de seringueira com os valores da madeira sólida de *Tectona grandis* (teca), onde foram observados 9400 N/mm² e 9100 N/mm² respectivamente e para o f_m 87,7 N/mm² e 66,5 N/mm² respectivamente. Para a compressão paralela às fibras foram observados 48,3 N/mm² e 41,1 N/mm² respectivamente;

Ainda segundo estes autores, para o cisalhamento paralelo à linha de cola foram observados 9,4 N/mm² para os painéis LVLs e 7,6 N/mm² para a madeira de teca e por fim, 10,5 N/mm² e 9,2 N/mm², respectivamente, para o cisalhamento perpendicular à linha de cola.

KAMALA et al. (1999) concluíram que as propriedades mecânicas de LVL de seringueira são geralmente equivalentes às propriedades mecânicas das madeiras sólidas de *Artocarpus lakooch* (lakooch), *Calophyllum elatum* (poon), *Cedrus deodar* (deodar), *Gmelina arborea* (gamari), *Lagarstroemia lanceolata* (benteak), *Paloquium ellipticum* (pali) e *Tectona grandis* (teak ou teca); madeiras normalmente utilizadas para a fabricação de portas, esquadrias, pisos, movelaria entre outros.

3.4.4.4. Efeito do tempo e temperatura de prensagem

Dentre os fatores do processo de confecção de painéis LVLs que influenciam a qualidade da colagem e por fim nas propriedades mecânicas, o tempo de prensagem é fundamental para promover a adesão necessária durante o processo de cura dos adesivos. O tempo de prensagem pode ser decisivo para a transferência de calor para regiões mais internas do painel e assim promover a correta cura do adesivo, como é o caso dos adesivos fenólicos, uréia-formaldeído e fenol-formaldeído (BALDWIN, 1981 e SELLERS, 1985).

Na determinação das propriedades mecânicas de painéis LVLs que foram utilizados adesivos fenólicos, o tempo e temperatura de prensagem predominantes foram aqueles recomendados pelo fabricante do adesivo (GABRIEL et al. 2008 e PALMA et al. 2008). Entretanto, outras metodologias foram testadas, ou seja, foram realizadas adaptações quanto a estes dois fatores, aumentando-se o tempo (mais de 30 minutos) e a temperatura de prensagem (acima de 130°C) (SOUZA et al. 2008a; CARVALHO et al. 2004).

SCHUKLA e KAMDEN (2008), testaram quatro tempos de prensagem (2, 5, 15 e 20 minutos) à 1,38 N/mm² de pressão e 38°C de temperatura em painéis LVLs confeccionados com lâminas das espécies *Acer saccharum* (*silver maple*), *Liriodendron tulipifera* (*yellow poplar*) e *Populus Tremuloides* (*aspen*), utilizando-se o adesivo PVAc. Observou-se que em termos de E_m e f_m , os valores não foram diferentes estatisticamente.

3.4.5. Propriedades físicas e fatores influentes

A madeira e seus compostos são para a humanidade uma fonte de matéria-prima inestimável, sendo utilizada em diversas condições. De acordo com as condições de uso, os compostos de madeira podem ser classificados basicamente em produtos de uso interior ou de uso exterior.

A primeira classificação diz respeito à utilização em interiores de construções ou residências, onde a influência das intempéries é menos severa havendo um controle da umidade e temperatura. Por outro lado, a segunda condição de uso refere-se à utilização em exteriores, onde a madeira e seus compostos permanecerão sujeitos a uma variação muito pronunciada da temperatura e umidade, assim como da radiação solar, tornando

tais condições mais propícias à degradação do material. Desta forma, estas condições de maior umidade e temperatura propiciam a biodeterioração (estabelecimento de fungos e insetos) e a variação dimensional.

Estas condições de uso exterior de produtos à base de madeira acarretam mudanças quase sempre negativas para propriedades do material (BODIG e JAYNE, 1993). Portanto, rachaduras podem surgir nas peças de madeira, ocorrem perdas de partículas em painéis de madeira reconstituída e freqüentemente observa-se uma variação dimensional.

A variação dimensional de painéis de madeira ocorre em espessura e linearmente. Os valores dessas variações oscilam entre 0,25-0,55% linearmente, enquanto que para a espessura não há padrão de valores, variando de acordo com a concepção tecnológica do material (HAYGREEN e BOWYER, 1996). De acordo com a literatura, os valores do inchamento em espessura são bastante controversos.

PIO (2002) observou que em painéis LVLs de *Eucalyptus grandis* e adesivo fenol-formaldeído, quanto maior a densidade do painel, maior o inchamento em espessura nas primeiras duas horas de imersão, para as lâminas provindas de toras com 15 anos.

Esta relação não foi observada por SCHUKLA e KAMDEN (2008), onde apesar de mais denso (0,54 g/cm³), os painéis LVLs da espécie *silver maple* apresentaram inchamento em espessura semelhante (aproximadamente 0,50%) aos painéis de *yellow poplar* e *aspen* (0,49 e 0,49 g/cm³ respectivamente), nas primeiras duas horas de imersão em água. Neste estudo foi utilizado adesivo PVA.

Segundo HAYGREEN e BOWYER (1996) essa diferença é devido basicamente ao grau de restrição ao inchamento proporcionado pelos diferentes produtos que compõem o painel de madeira, grau de compressão a que foi submetido o material (lâmina, partículas ou fibras) durante o processo de confecção e efeito do adesivo e aditivos empregados na confecção do painel.

Em painéis compensados, as lâminas coladas uma às outras perpendicularmente restringem a movimentação dimensional do painel, o que resulta em um composto mais resistente às flutuações da umidade. Nota-se que sem o adesivo para unir as lâminas na confecção do painel, o inchamento ocorrerá tal qual para a madeira serrada. Os aditivos, resinas sintéticas ou ceras, são comumente utilizadas na tentativa de formar painéis de

madeira com maior estabilidade dimensional. Assim, os aditivos têm papel de isolar os sítios de adsorção de água (grupos “- OH”), servindo como hidrorrepelentes, como é o caso da resina fenol-formaldeído (HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Diferentemente dos compensados, os painéis LVLs não possuem a disposição cruzada das lâminas de madeira (disposição perpendicular uma as outras), fazendo com que o comportamento do painel frente à absorção de água seja mais semelhante à madeira maciça, restringindo a movimentação dimensional a aquela relativa às propriedades da madeira e aos processos de confecção dos painéis (adesivo, tempo de pressão e temperatura) (HARDING et al. 1998; KAMALA et al. 1999; PIO, 2002).

Entretanto, alguns estudos vêm procurando intercalar as lâminas na posição perpendicular às fibras com o intuito de se aprimorar a estabilidade dimensional do painel LVL (GABRIEL et al., 2008; BURDURLU et al, 2007).

Quando um painel de madeira é submetido à grande umidade, os sítios de ligação “-OH” presentes nas paredes celulares das fibras adsorvem a água promovendo uma movimentação dimensional destas células e conseqüentemente do painel. Esta movimentação dimensional dos painéis no sentido da sua espessura é denominada inchamento em espessura e quando no sentido do comprimento, dá-se o nome de expansão linear.

O inchamento em espessura nos painéis de madeira é constituído de dois fatores: o inchamento ocasionado pela adsorção de água e o inchamento provocado pela liberação das tensões de prensagem (MEDINA, 1986).

O primeiro fator, também conhecido por inchamento higroscópico é um fenômeno natural que ocorre em qualquer peça de madeira submetida à alta umidade, ou seja, quando uma peça de madeira entra em contato com alta umidade, ela expande até que suas fibras estejam saturadas de água e quando esta peça de madeira é disposta em condições de baixa umidade ela contrai, voltando ao seu estágio inicial. O segundo fator, relativo às tensões de compressão, é determinante para painéis de madeira, ou seja, devido aos processos de confecção destes produtos, o contato com a umidade faz com que haja uma liberação das tensões de compressão a que foram submetidos, ocorrendo também o inchamento do painel (DEL MENEZZI, 2006).

Portanto, um painel de madeira após um período de contato com alta umidade, quando disposto a secar, este terá uma espessura diferente da condição inicial, devido à

liberação das tensões de compressão, conhecido como inchamento em espessura pelas tensões de compressão, sendo esta uma condição irreversível. Dá-se a este fenômeno também o nome de taxa de não-retorno em espessura (Fig. 07).

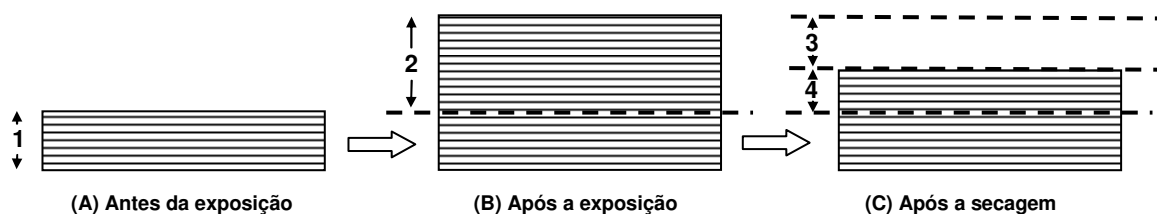


Figura 07. Mecanismo de inchamento em espessura de painéis de madeira, onde se tem os períodos A, B e C respectivamente, anterior a exposição à umidade, posterior a exposição à umidade e posterior à secagem; e onde 1- espessura inicial do painel de madeira, 2- inchamento total, 3- inchamento higroscópico e 4- inchamento pela liberação das tensões de compressão. Fonte: adaptado de DEL MENEZZI (2006).

Uma vez que o painel teve sua espessura final aumentada em função do inchamento proporcionado pela exposição à umidade, isso implica em redução da sua massa específica, ou seja, tem-se uma massa de partículas distribuída por um volume maior de painel. Por isto o inchamento em espessura normalmente é acompanhado pela perda de resistência do painel (LEE e WU, 2002). Estes autores evidenciaram que o inchamento de painéis no plano longitudinal embora de menor magnitude que o IE, gera tensões internas que reduzem os valores do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade na flexão estática.

O conhecimento da densidade de produtos à base de madeira reconstituída é importante, pois permite tirar conclusões sobre a adaptabilidade do produto como material de construção para fins estruturais, devido à boa relação existente entre resistência e massa específica (PIO, 2002).

De acordo com KELLY (1977) a densidade é o principal fator para diminuir o teor de umidade de equilíbrio em painéis aglomerados e, além disso, os adesivos podem exercer um bloqueio adicional aos sítios de adsorção (menor disponibilidade dos sítios “-OH”, responsáveis pela adsorção de água na parede celular das fibras na madeira). O calor reduz a higroscopicidade da madeira e a pressão compacta as camadas externas do painel tornando os sítios de adsorção menos disponíveis.

De acordo com PIO (2002), a densidade é uma propriedade física extremamente relevante para compostos estruturais de madeira, pois esta propriedade influencia diretamente as propriedades de rigidez mecânica, a absorção e dessorção de água e assim relaciona-se com a estabilidade dimensional. Portanto, da densidade dependem a maior parte das propriedades físicas e mecânicas, podendo auxiliar como parâmetro de classificação de um produto.

Segundo PAKER (1979) citado por PIO (2002), as diferenças no arranjo dos tecidos, dimensões e espessura da parede celular determinam valores próprios da massa específica para cada espécie de madeira. A resistência da madeira possui estreita relação com sua massa específica e isso pode ser determinante em produtos à base de madeira.

Para painéis LVLs a densidade final do produto é influenciada pela espécie de madeira utilizada e suas características, o tipo e quantidade de adesivo e as características do processo produtivo, como a pressão, o tempo e temperatura de prensagem (Tabela 01) e geralmente formam um produto bastante homogêneo em densidade.

Tabela 01. Densidades aparentes observadas para painéis LVLs em diferentes estudos.

Estudo	Espécie	Adesivo	Dens. (g/cm ³)
KAMALA et al. (1999)	<i>Pinus sylvestris</i>	PVAc	0,590
		Poliuretano	0,570
		UF	0,680
		FF	0,650
	<i>Abies nordmanniana</i>	PVAc	0,500
		Poliuretano	0,480
		UF	0,580
		FF	0,550
SHUKLA e KAMDEN, (2008)	<i>Acer saccharum</i>		0,572
	<i>Liriodendron tulipifera</i>	PVAc	0,455
	<i>Populus Tremuloides</i>		0,558
PALMA et al. (2008a)	<i>Eucalyptus grandis</i>	FF	0,690
PALMA et al. (2008b)	<i>Pinus caribaea e P. oocarpa</i>	FF	0,597

Onde: PVAc: Polivinil-acetato; UF: Uréia-formaldeído; FF: Fenol-formaldeído.

3.4.5.1. Efeito dos processos industriais

De acordo com HARDING et al. (1998), o aumento do número de lâminas no painel LVL aumenta a estabilidade dimensional e reduz as variações na resistência e rigidez devido ao número maior de linhas de adesivo que conseqüentemente aumenta a quantidade de adesivo no painel.

SHUKLA e KAMDEN (2008) verificaram a influência do tempo de prensagem (2, 5, 15 e 30 minutos) nas propriedades físicas, inchamento em espessura e absorção de água em painéis LVLs confeccionados com lâminas de *silver maple* (*Acer saccharum*), *yellow poplar* (*Liriodendron tulipifera*) e *aspen* (*Populus tremuloides*) unidas por adesivo PVAc. Os autores observaram que há uma tendência quando aumenta-se o tempo de prensagem, ocorre redução da absorção de água no período de 24 horas de imersão, sendo que para o tempo de prensagem de 15 minutos, foram observados os valores de 66,75; 44,31 e 54,71% para as três espécies respectivamente. Em relação ao inchamento em espessura, não houve diferença significativa entre os tratamentos para as três espécies, onde o valor desta propriedade variou entre 2,43 e 5,29% para o período de 24 horas de imersão em água.

KAMALA et al. (1999) estudando LVL confeccionados com 17 lâminas de seringueira (*Hevea brasiliensis*) unidas por fenol-formaldeído, verificaram uma densidade de 0,718 g/cm³. Já em UYSAL (2005) os painéis LVLs com lâminas das madeiras de *scotch pine* e *black sea fir* (*Pinus sylvestris* e *Abies nordmanniana*, respectivamente) para diferentes tipos de adesivos (PVAc, Poliuretano, uréia-formaldeído e fenol-formaldeído), observou-se os seguintes valores da densidade para os citados adesivos: para *scotch pine* – 0,59; 0,57; 0,68 e 0,65 respectivamente; e para *black sea fir* – 0,50; 0,48; 0,58 e 0,55 respectivamente. Estas diferenças segundo o autor foram devidas ao processo de confecção exigida para cada tipo de adesivo, onde é necessária uma determinada pressão, temperatura e tempo de prensagem.

3.5. AVALIAÇÕES NÃO-DESTRUTIVAS (AND)

A madeira como material biológico sofre muita interferência negativa do meio externo durante sua formação, até chegar a um ponto de utilização como produto final. Assim, a genética da espécie e do indivíduo, as intempéries (chuva, vento, entre outros) e ataques de insetos, criam muitas variações e imperfeições no produto madeira, tendo

por conseqüência, muitas vezes, a frustração de construtores e usuários de peças de madeira (ROSS et al. 1998)

Para o produto madeira estas imperfeições ocorrem naturalmente e as avaliações não destrutivas trabalham com o foco de desenvolver tecnologia para medir como o meio ambiente influencia na sua constituição, induzindo-o às irregularidades, determinando seu desempenho (ROSS et al. 1998). Além disso, este tipo de tecnologia também pode prever possíveis falhas ou defeitos no interior de peças de madeiras visualmente perfeitas, reduzindo riscos de acidentes quando se dá a utilização destas peças em estruturas à base de madeira.

Por definição, a avaliação não destrutiva (AND) é dita como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar suas capacidades de uso final, usando tais informações das propriedades para tomar decisões, resguardando uma aplicação apropriada (ROSS et al. 1998). Segundo MINA et al. (2004) e OLIVEIRA e SALES (2002), esta é a grande vantagem, ou seja, não se faz necessário a extração de corpos-de-prova, viabilizando assim, o estudo da integridade estrutural da madeira.

Dentre muitas outras vantagens das avaliações não-destrutivas, OLIVEIRA e SALES (2002) citam que os métodos não destrutivos, em comparação com os métodos convencionais para caracterização da madeira, possibilitam a maior rapidez para analisar um grande estoque de produtos e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produtos. Trata-se, portanto, de uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados (ERIKSON et al. 2000).

A técnica que utiliza ondas de tensão (Fig. 08) tem recebido considerável atenção. Nas últimas décadas, a utilização desta técnica cresceu muito e tem sido extensivamente pesquisada, pois podem ser avaliadas as propriedades mecânicas do material, em condição seca (HAN et al., 2006).

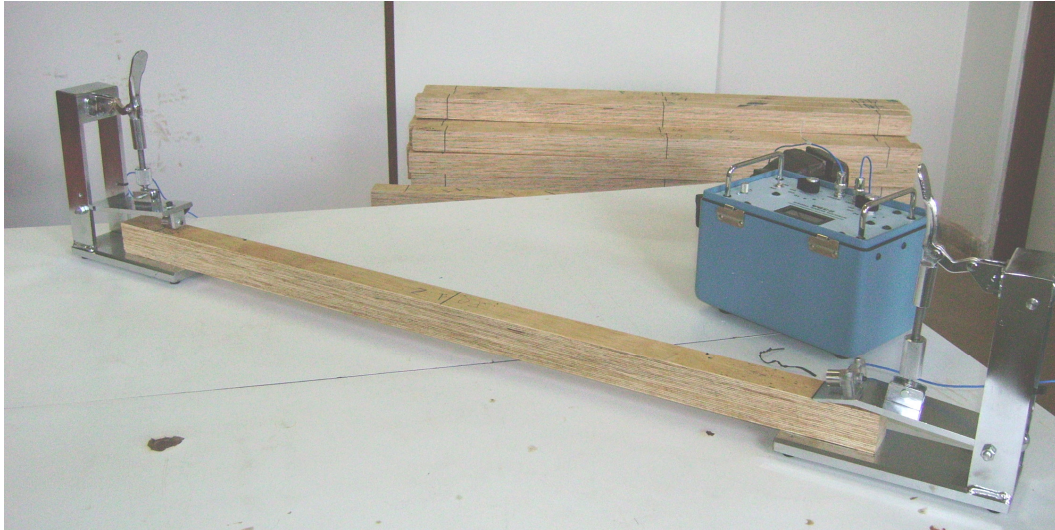


Figura 08. Equipamento de avaliação não-destrutiva *Stress Wave Timer 239 A* da marca *Metriguard*. (Um pêndulo à direita faz gerar uma onda de tensão que irá percorrer toda a peça.).

Esta onda é um excelente indicador das propriedades mecânicas da madeira e de produtos à base de madeira. Correlações muito fortes vêm sendo observadas na literatura entre as propriedades mecânicas e os parâmetros das ondas de tensão, como a velocidade de propagação (V_0) e o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) em painéis de lâminas paralelas (LVL), painéis aglomerados, MDF, entre outros.

GABRIEL (2007) verificou a relação existente entre a V_0 e o módulo de elasticidade em flexão estática (E_m) e a relação entre o E_{md} e E_m para painéis LVLs confeccionados com 25 lâminas pré-classificadas de *Pinus caribaea* (var. *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*) e *Pinus oocarpa* e aderidos por adesivo fenol-formaldeído. Neste estudo, foram observados os seguintes resultados: na relação entre V_0 e E_m , o R^2 foi de 0,7171 e na relação entre E_{md} e E_m , o R^2 foi de 0,6957.

O *Stress Wave Timer* utiliza dois sensores dispostos no final do caminho de propagação da onda para detectar o sinal. O primeiro sensor deve ser posicionado no lado onde será produzido o impacto para gerar a onda de tensão e o segundo posicionado no lado oposto ao do impacto. Desta forma, o tempo de propagação começa a ser contado quando a onda de tensão chega ao primeiro sensor e termina quando esta atingir o segundo sensor. Ao término deste processo, o tempo de propagação é mostrado no visor do aparelho (METRIGUARD, 1997).

Segundo GABRIEL (2007), o método das ondas de tensão fundamenta-se na teoria de propagação unidimensional, para uma barra homogênea e elástica. Nota-se que a madeira não é um material homogêneo nem isotrópico, assim como os painéis à base de madeira não são materiais completamente homogêneos e isotrópicos, ocasionando variações na propagação da onda, entretanto bons resultados são observados utilizando-se esta teoria (ROSS e PELLERIN, 1998; NZOKOU et al. 2005; GABRIEL, 2007).

3.5.1. Efeito do eixo estrutural na avaliação não-destrutiva

Segundo a norma ASTM D 5456-06 (ASTM, 2006) os compostos estruturais de madeira (LVL, LSL e OSL) devem ser avaliados para as duas possíveis posições: *flatwise* e *edgewise* (ver Fig. 6), também conhecidas na literatura como de menor e maior inércia, respectivamente, de acordo com a posição da lâmina na composição do painel (GABRIEL et al. 2008; PALMA et al. 2008a; PALMA et al. 2008b).

Para CARVALHO et al. (2004), o simples fato de se confeccionar painéis LVLs, já o tornam ligeiramente densificados em suas extremidades, devido às altas pressões e temperaturas, visto que as lâminas são prensadas em posição perpendicular à área da lâmina, portanto na posição *flatwise*.

Assim, ainda segundo tais autores, nas extremidades do painel há uma sutil compactação das lâminas, promovendo uma densificação nesta região, o que não ocorre em grande intensidade na região do miolo (porções mais internas do painel), pois a ação do calor não é tão intensa, devido ao não contato com os pratos quentes da prensa.

Este fato foi comprovado por GABRIEL (2007), que distribuiu termopares nas linhas de cola de painéis LVLs e verificou o comportamento e distribuição da temperatura durante o processo de cura do adesivo (Fig. 9). Para tal autor, ficou claro que as camadas superficiais aumentam sua temperatura rapidamente e que as regiões mais internas levam um tempo superior para elevar a temperatura, visto que o processo de condução de calor na madeira é lento, devido às propriedades de isolamento térmico da madeira.

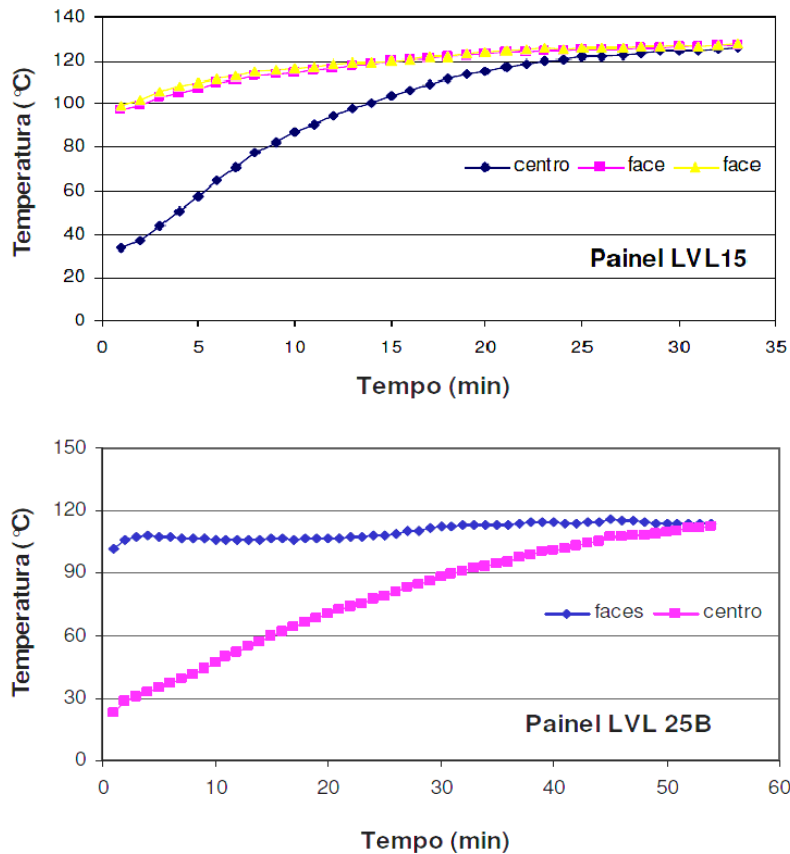


Figura 09. Comportamento da temperatura na face, contra-face e miolo durante o processo de prensagem à quente de painéis LVLs de *Pinus caribaea* de 15 lâminas (parte superior) e de 25 lâminas (parte inferior). Fonte: GABRIEL (2007).

Portanto, esta posição de prensagem das lâminas no eixo *flatwise* resulta em diferenças significativas na V_0 entre as posições *flatwise* e *edgewise* (SOUZA et al. 2008a). Ainda, para tais autores, a V_0 é maior para a posição de ensaio *flatwise* que a posição *edgewise* (Fig. 10).

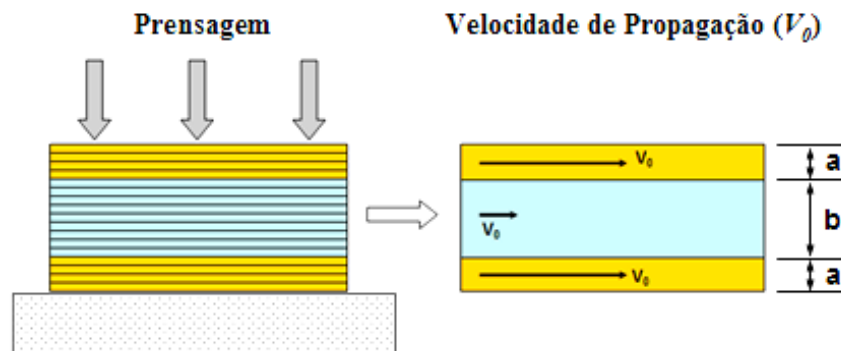


Figura 10. Diferenças na velocidade de propagação das ondas de tensão em painéis LVLs causadas pelo processo de confecção. Devido às altas pressões e temperaturas impostas na prensagem (lado esq.), são formadas zonas de densificação (região “a”) nas extremidades ou superfícies do painel, enquanto que no miolo (região “b”) não se observam muitas alterações.

3.5.2. Efeito do teor de umidade contido no material

De uma forma geral a umidade influencia negativamente na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0). Assim, quanto maior for o teor de umidade presente no material a ser avaliado, menor será a V_0 (SIMPSON e WANG, 2001; BRASHAW et al. 2004; e HAN et al. 2006) (Fig. 11).

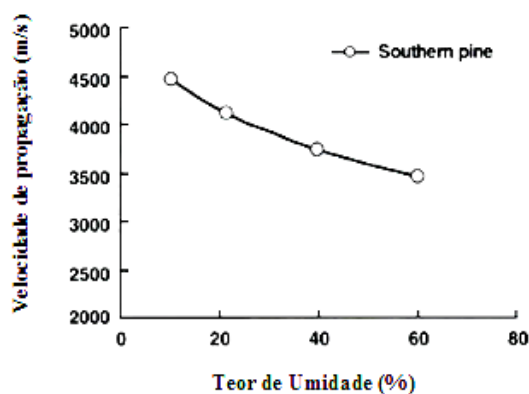


Figura 11. Comportamento da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) frente à variação do teor de umidade em lâminas de *southern pine* (*Pinus spp.*).

Este fenômeno está relacionado com o grau de afastamento das paredes celulares, quando a madeira absorveu umidade, até o ponto de saturação das fibras. Neste momento percebe-se que as camadas que formam as paredes celulares estão distanciadas pela presença da água higroscópica (HAYGREEN e BOWYER, 1996), ocasionando assim a redução na V_0 . Por outro lado, quando a madeira seca, as paredes

celulares tendem a ficar mais justapostas pela liberação da água de adesão, tornando a madeira neste momento um material mais coeso, aumentando desta forma a V_0 .

SIMPSON e WANG (2001) estudaram o comportamento da V_0 no sentido longitudinal em toras de madeira das espécies *ponderosa pine* (*Pinus ponderosa*) e *sugar maple* (*Acer saccharum*) durante o processo de secagem e observaram que a V_0 decresce linearmente com o aumento do teor de umidade.

BRASHAW et al. (2004) estudando o efeito da umidade na V_0 em lâminas de todas classes visuais (A, B, C e D) das *southern pine* (*Pinus spp.*) e *douglas-fir* (*Pseudotsuga menziessi*) com 3 mm de espessura, verificaram que é evidente a relação inversa entre a umidade e a V_0 . Neste estudo, foram utilizadas 200 lâminas de *southern pine* e 60 de *douglas-fir* com dimensões iguais a 254 x 66 cm (comp. x larg.), teor de umidade entre 33 e 106% para as lâminas úmidas e teor de umidade variando entre 8 e 10%. Segundo tais autores, observou-se que à medida que se aumenta a umidade das lâminas, independentemente da espécie, decresce a V_0 . Ainda, notou-se uma correlação muito forte entre as velocidades de propagação nas lâminas úmidas e secas, sendo em torno de 82% ($R^2 = 0,82$).

Em compostos à base de madeira, este comportamento também é observado. HAN et al. (2006) verificaram o comportamento da V_0 frente a variação de umidade de diversos painéis, entre eles: o painel compensado com 12 mm de espessura de *southern pine* (*Pinus spp.*), painel OSB de 12 mm de espessura com partículas de diferentes espécies misturadas e aglomerado com 16 mm de espessura da espécie *southern pine* (*Pinus spp.*). Tais autores verificaram que se elevando a umidade de 0,6% para 23%, tem-se uma diminuição na V_0 independentemente do painel (Fig. 12).

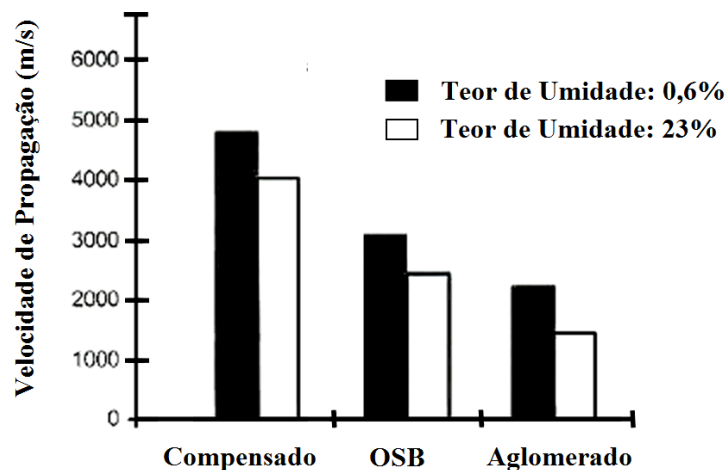


Figura 12. Comportamento da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) frente à variação de umidade em painéis compensados, OSB e aglomerados. Fonte: HAN et al. (2006).

DEL MENEZZI et al. (2007) observaram comportamento semelhante em painéis OSB de *Pinus* sp. tratados termicamente a duas temperaturas (190 e 220°C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos). Após o tratamento térmico, houve redução na umidade de equilíbrio, o que alterou a V_0 de 2838 m/s para 2806 m/s no sentido paralelo e de 2633 m/s para 2602 m/s no sentido perpendicular destes painéis.

3.6. BIODETERIORAÇÃO

Os fungos e os cupins são os responsáveis pelos maiores danos biológicos nas madeiras (LOPEZ e MILANO, 1986). A biodeterioração da madeira ocorre porque os organismos reconhecem os polímeros naturais da parede celular como fonte de nutrição, e alguns deles possuem sistemas enzimáticos específicos capazes de metabolizá-los em unidades digeríveis (OLIVEIRA et al. 1986).

Dos vários tipos de organismos que deterioram a madeira, os fungos apodrecedores são os grupos mais importantes, responsáveis pelos maiores danos aos produtos florestais, podendo causar o colapso da estrutura da madeira muito rapidamente (LEPAGE, 1986). Ainda, os fungos são os maiores responsáveis pela diminuição da vida útil da madeira, onde consomem basicamente celulose e lignina, diminuindo assim, não só a resistência mecânica da madeira, como também o seu peso (MENDES e ALVES. 1986).

As classes de fungos, geralmente encontradas deteriorando a madeira, são definidas como: de podridão branca, podridão parda e podridão mole, que se diferenciam pelo aspecto visual da madeira atacada biologicamente (VALENZUELA et al. 2006). Quando esses organismos atacam a madeira, os sintomas principais são: a perda de resistência, amolecimento caracterizado pela textura quebradiça da madeira, perda de peso, mudança de coloração e cheiro (MENDES e ALVES, 1986).

CURLING et al. (2002) estudaram a degradação biológica de madeira sólida de *Pinus* spp. (*southern pine*) com fungos de podridão parda *Gloeophyllum trabeum* e *Postia placenta* em um período de 12 semanas e observaram que a perda de resistência mecânica (no módulo de elasticidade e módulo de ruptura) são semelhantes para as duas espécies de fungos. Ainda segundo os autores, a perda de resistência mecânica observada nos ensaios de apodrecimento está relacionada com a perda de massa amplamente discutida na literatura (CHUNG et al. 1999; KARTAL e GREEN, 2003; OKINO et al. 2005; OKINO et al. 2007).

A Tabela 02, apresenta algumas modificações ao nível anatômico e químico causados por fungos xilófagos, segundo MARTÍNEZ et al. (2005).

Tabela 02. Características e modificações químico-anatômicas causadas por fungos de podridão branca e parda.

CARACTERÍSTICAS	PODRIDÃO BRANCA		PODRIDÃO PARDA
Aspectos do Apodrecimento e Consistência	Aparência esbranquiçada, menor coloração que madeira sadia, leveza, aspecto esponjoso e perda de resistência em degradação avançada		Aspecto escuro, esmigalhamento e formação de pó, consistência quebradiça, drástica perda de resistência nas fases iniciais
Tipo de Madeira	Apodrecimento Simultâneo	Deslignificação Seletiva	Madeiras de coníferas
	Madeira de folhosas, raramente de coníferas	Madeiras de folhosas e de coníferas	
Modificações químicas na parede celular	Celulose, lignina e hemicelulose	Ataque inicial seletivo por hemicelulose e lignina. Celulose.	Celulose e hemicelulose. Lignina modificada levemente
Modificações anatômicas	Parede celular atacada progressivamente pelo lúmen. Erosões sulcadas associadas com as hifas	Degradação da lignina na lamela média e na parede secundária. Lamela média dissolvida por mecanismos de difusão (não em contato com a hifa), cavidades radiais na parede celular.	Degradação a grande distância das hifas (mecanismos de difusão). Toda célula é atacada rapidamente com aparecimento de fissuras, fendas e rachaduras
Agentes causadores	Basidiomicetos: <i>Trametes versicolor</i> , <i>Irpex lacteus</i> , <i>Poria chrysosporium</i> e <i>heterobasidium anosum</i> e alguns ascomicetos como a <i>Xylaria hypoxylon</i> .	Basidiomicetos: <i>Ganoderma australe</i> , <i>Phlebia tremellosa</i> , <i>C.subvermispora</i> , <i>Pleurotus spp</i> e <i>Phellinus pini</i> .	Basidiomicetos exclusivamente: <i>C. puteana</i> , <i>Gloeophyllum trabeum</i> , <i>Laetiporus sulphureus</i> , <i>Piptoporus betulinus</i> , <i>Postia placenta</i> e <i>Serpula lacrimans</i>

Fonte: MARTÍNEZ et al. (2005).

Com relação aos painéis de madeira, esta redução da resistência mecânica também é observada devido à deterioração da madeira que constitui os painéis, seja ela fibra, partículas “*strands*”, “*flakes*”, entre outros; ou lâminas. Desta forma, CHUNG et al. (1999) citam que deve ser muito bem planejada a utilização de painéis de madeira em uso exterior (maior temperatura e umidade) para se prevenir a biodeterioração causada por fungos.

Tais estudos para determinar a influência da degradação biológica em painéis de madeira vêm sendo realizados há algum tempo para painéis MDF, aglomerados, OSB, chapas de madeira-cimento entre outros, conforme pode ser observado na literatura (CHUNG et al. 1999; OKINO et al. 2004 e 2007; KARTAL e GREEN, 2003). Por outro lado, pouca literatura é encontrada a respeito da biodeterioração em painéis LVLs.

3.6.1. Podridão branca

Os fungos basidiomicetos que causam a podridão-branca em madeiras têm recebido grande atenção ultimamente, pois geralmente estão associados à deterioração de madeira em angiospermas e também porque possuem um potencial de uso industrial, onde podem ser utilizados, por exemplo, como pré-tratamento da madeira para a produção da pasta de celulose nas indústrias de papel e celulose (FERRAZ et al. 1998).

Essa classe de fungo deteriora mais extensivamente e mais rapidamente a lignina que outros grupos funcionais da madeira, podendo deteriorar a lignina completamente, transformando em dióxido de carbono e água (CULLEN e KERSTEN, 1994 citado por FERRAZ et al. 1998).

Inicialmente ocorre uma descoloração da madeira, ficando mais esbranquiçada que a cor natural. A madeira atacada somente colapsa e se racha em estágio mais severo de ataque, mas gradualmente, perde as suas estruturas fundamentais e se torna esponjosa e macia. Os fungos de podridão branca atuam na superfície da parede celular, sendo que suas ações, através de seus sistemas enzimáticos, provocam a formação de fendas ou orifícios, local de alojamento do fungo. Com a evolução do ataque, as fendas vão aumentando e assim provocam uma erosão da parede celular, no sentido do lúmen a lamela média (OLIVEIRA et al., 1986).

Segundo FERNANDES et al. (2005), várias enzimas são utilizadas por esta classe de fungos apodrecedores. Entre elas, citam-se: lignina-peroxidase (ligninase), Mn-dependente peroxidase e laccase; dependendo da espécie de fungo apodrecedor e do substrato.

3.6.2. Podridão parda

A podridão parda deteriora os componentes de polissacarídeos (celulose e hemicelulose) pela depolimerização sem degradar muito a lignina (CURLING et al. 2002). Segundo BLANCHETTE (1990) e KUO et al. (1998) citado por CURLING et al. (2002), a perda de polissacarídeos é mais observada na camada S₂ da parede celular, onde tais compostos estão mais disponíveis para a deterioração por parte das hifas dos fungos.

Os fungos causadores de podridão parda, comumente, atacam madeiras leves e se alimentam especialmente de celulose, componente da parede celular, deixando um resíduo de coloração marrom da lignina, substância esta que atua como matriz na manutenção das células da madeira. A madeira atacada por fungo de podridão parda apresenta-se mais escura comparada à mesma em sua cor normal; tendo uma coloração pardo-escura no final do ataque. Em estados mais avançados de podridão, a madeira quando seca, tende a se quebrar, com a formação de trincas paralelas e perpendiculares à grã. Este tipo de apodrecimento é conhecido como “podridão em cubo” (OLIVEIRA et al. 1986).

A madeira com podridão parda, além de perda de massa e diminuição das propriedades físicas e mecânicas, apresenta resistência ao impacto rapidamente afetada. Torna-se ligeiramente mais escurecida, adquirindo coloração parda, mostrando rachaduras perpendiculares e paralelas às fibras e fissuras por toda a peça (COSTA, 1981).

3.6.3. Biodeterioração de painéis de madeira

O ataque de microorganismos vem se tornando um problema notável em produtos à base de madeira, influenciando todas as suas propriedades (CHUNG et al. 1999).

Ainda segundo este autor, os painéis de madeira, entre eles os aglomerados, os painéis de média densidade (MDF), os OSB, os LVL, entre tantos outros, apesar de suas tecnologias de produção, ainda são materiais susceptíveis à ataques biológicos na deterioração da madeira, principalmente por fungos apodrecedores conhecidos comumente como fungos de podridão parda e podridão branca. Esta ação biológica é

intensificada quando tais painéis de madeira estão sujeitos ao uso exterior, em condições de alta umidade e temperatura.

Algumas particularidades podem ser determinadas para a intensidade da deterioração, como a porcentagem de partículas do cerne em relação às partículas do alburno. Segundo BEHR (1972) citado por CHUNG et al. (1999), quanto maior for a quantidade de partículas, a formar o painel, provenientes do cerne, maior será a resistência à degradação biológica devido à maior presença de extrativos.

Geralmente se aceita que os painéis de madeira reconstituída apresentam maior resistência à deterioração que a madeira sólida, entretanto estes produtos ainda são suscetíveis a esta ação, diminuindo a resistência mecânica e limitando a sua utilização, principalmente para fins estruturais (KARTAL e GREEN, 2003).

Dentre os vários tipos de uniões coladas proporcionadas pelos diversos adesivos (fenol-formaldeído, uréia-formaldeído, resorcinol-formaldeído, isocianatos, entre outros), as colagens feitas com fenol-formaldeído são preferidas em finalidades estruturais pela alta resistência à água e a umidade, porém, os ataques fúngicos nestas uniões coladas têm se mostrado tão severo quanto em colagens realizadas com uréia-formaldeído (CHOW et al. 1999 citado por KARTAL e GREEN, 2003).

A durabilidade de painéis de madeira pode ser avaliada de três maneiras: na sua utilização final (em serviço), nos campos de apodrecimento e em testes acelerados de laboratório (CURLING e MURPHY, 2002). Dentre estes, o método mais utilizado devido às padronizações e rapidez dos ensaios, é o ataque acelerado em laboratório. O maior problema relacionado aos outros dois métodos (utilização final e campos de apodrecimento) é o longo período necessário para a determinação da resistência do material avaliado.

Apesar de negligenciar a massa de fungos (micélios) presentes no interior dos corpos-de-prova atacados biologicamente, que poderia subestimar a perda de massa do material atacado, o fator mais utilizado para medir a intensidade da deterioração é a porcentagem de perda de massa (JONES e WORRAL, 1995).

CHUNG et al. (1999) estudaram a intensidade da deterioração pela perda de massa em um período de duas, quatro, seis e oito semanas em alguns painéis de madeira, entre eles: compensado (17,5 mm de espessura e 0,508 g/cm³ de densidade), painel OSB (11,1 mm e 0,607 g/cm³), painel aglomerado (15,9 mm e 0,607 g/cm³),

painel MDF (15,9 mm e 0,749 g/cm³) e madeira sólida de *Picea glauca* – Spruce (12,4 mm e 0,385 g/cm³); utilizando-se o fungo de podridão parda *Tyromyces palustris* e o fungo de podridão branca *Phanerochaete chrysosporium*. Os autores concluíram que dentre os tipos de painéis que foram estudados, os painéis compensados e os OSB tiveram maior intensidade na deterioração, entretanto, o processo de desenvolvimento das hifas e da biodeterioração ocorrem distintamente. Nos painéis compensados, o caminho a ser percorrido pelas hifas dos fungos é facilitado pela conectividade dos vasos da madeira enquanto que para os painéis OSB, assim como para os painéis aglomerados, devido à descontinuidade do material, os fungos se desenvolvem nos espaços vazios ocasionados pelo processo de fabricação, reduzindo a intensidade do ataque biológico em um primeiro momento.

Painéis de madeira-cimento são painéis minerais constituídos basicamente por partículas ou fibras de biomassa vegetal (normalmente madeira), água, aditivos e o aglomerante (IWAKIRI, 2005). O aglomerante mais utilizado é o cimento *Portland*. Segundo OKINO et al. (2005), a bibliografia referente a degradação de painéis de cimento madeira ainda é escassa e poucas pesquisas foram desenvolvidas para a determinação da resistência à deterioração destes compostos lignocelulósicos.

Em painéis de cimento madeira dos estudos de OKINO et al. (2005), confeccionados com partículas de *Cupressus spp.*, ensaiados para a deterioração com o fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum* e o fungo de podridão branca *Trametes versicolor* por um período de 12 semanas, os autores observaram inicialmente que os micélios dos fungos não se desenvolveram sobre os corpos-de-prova, comprovadamente pela porcentagem de massa perdida pelo material, onde tal valor não foi alterado. Os autores citaram que este fato pode ser explicado pelo alto valor do pH (11,3) observado nos painéis de cimento madeira confeccionados.

Os painéis de partículas orientadas ou OSB (*oriented strand boards*) são painéis estruturais confeccionados com partículas de madeira do tipo “strand” dispostas em camadas orientadas (partículas no mesmo sentido das fibras) alternadas perpendicularmente uma sobre as outras (IWAKIRI, 2005).

Segundo OKINO et al. (2007), que estudaram a intensidade da deterioração em painéis OSB confeccionados com madeira de Cipreste, Eucalipto e *Pinus*, a partir de dois tipos de adesivos (uréia-formaldeído e fenol-formaldeído) e com densidade final de 0,75 g/cm³, utilizando-se quatro fungos apodrecedores, entre eles: podridão parda

(*Gloeophyllum trabeum* e *Lentinus lepideus*) e podridão branca (*Trametes versicolor* e *Ganoderma applanatum*) em um período de 12 semanas; observaram que de uma forma geral, a resina fenol-formaldeído foi mais eficiente que a uréia-formaldeído (observou-se menor perda de massa com aquela resina) e a perda de massa foi maior em *Pinus*, seguido por Cipreste e Eucalipto.

DEL MENEZZI et al. (2008b) verificaram a perda de massa causada pelos fungos *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda) e *Trametes versicolor* (podridão branca) em painéis OSB de *Pinus sp.* tratados termicamente a duas temperaturas (190 e 220°C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos), o que resultaram nos tratamentos: T1-190°C/12min, T2-190°C/16min, T3-190°C/20min, T4-220°C/12min, T5-220°C/16min e T6-220°C/20min. Foi observado que para a maior temperatura (220°C) e para maiores tempos (T5 e T6), a perda de massa foi reduzida, devido a uma modificação na estrutura química das partículas, ou seja, em um primeiro momento, as hifas não identificaram o substrato como fonte de alimento. As perdas de massa obtidas pelos autores estão listadas na Tabela 03.

Tabela 03. Perda de massa (%) observada em painéis OSB tratados termicamente após ataque de fungos de podridão branca e podridão parda.

Tratamentos	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Perda de Massa (%)	
			Podridão Branca	Podridão Parda
T1	190	12	22,40	31,20
T2		16	20,10	31,40
T3		20	18,60	30,40
T4	220	12	21,20	30,80
T5		16	16,90	29,50
T6		20	16,00	28,10
Test.	-	-	23,10	38,80

Fonte: DEL MENEZZI et al. (2008b).

Segundo NZOKOU (2005), poucas referências sobre a durabilidade natural de painéis de lâminas paralelas (LVL) são encontradas na literatura, mas sabe-se que os processos de confecção deste tipo de painel, como a temperatura, tempo, laminação, pressão, tipo e quantidade de adesivo utilizada e a espécie a formar o painel, pode promover um incremento na durabilidade biológica, reduzindo a porcentagem de perda de massa.

Com isso, FOURGEROUSSE (1985) citado por NZOKOU et al. (2005), observou que a durabilidade de painéis LVLs confeccionados com espécies de madeiras ditas não resistentes à deterioração é maior que a própria madeira sólida de referência. O autor associou este fato à maior resistência à água por parte dos painéis de madeira e a toxidez inerente aos adesivos utilizados para a confecção dos painéis (adesivos dispostos nas várias linhas de cola).

NZOKOU et al. (2005) estudaram a resistência à deterioração de painéis LVLs, misturando lâminas de madeiras ditas resistentes à degradação biológica com lâminas ditas não-resistentes, tentando-se uma difusão de extrativos com características inibidoras de crescimento fúngicos das lâminas resistentes para as não-resistentes. Foram utilizados para o ensaio de biodeterioração, painéis LVLs de cinco lâminas cada (espessura das lâminas igual a 3,15 mm), consolidados por uma prensagem à quente por cinco minutos a 160°C e 1,2 MPa de pressão e adesivo fenol-formaldeído a 200 e 250 g/m². Como conclusão, os autores citaram que a durabilidade natural da madeira sólida é compatível à dos painéis LVLs; a pressão e o calor não afetam significativamente a durabilidade dos LVL devido à evaporação de extrativos voláteis com possíveis características inibidoras do crescimento fúngico; e as propriedades de resistência biológica podem ser sutilmente melhoradas quando são utilizadas lâminas de espécies com durabilidade natural maior, distribuídas na face e no interior do painel LVL.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os painéis LVLs foram confeccionados a partir de lâminas de madeira das espécies *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl e *Pinus kesiya* Royle ex Gordon com idades iguais a 28 e 30 anos respectivamente, provenientes do plantio experimental na região do Monte Olimpo localizado na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ situada no município de Piracicaba-SP. O processo de laminação foi semelhante ao descrito por BORTOLETTO JÚNIOR (2008), onde as toras foram seccionadas em toretes de aproximadamente 1,30m e aquecidas à 60°C por 12 horas. As lâminas foram obtidas em torno desenrolador marca THONS & BENATO, modelo LHT-14 no Laboratório de Laminação e Painéis de Madeira da ESALQ - Universidade de São Paulo (USP).

As outras etapas deste trabalho foram realizadas nos laboratórios de Química da Madeira, Biodegradação da Madeira, e Engenharia e Física da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), vinculado ao Serviço Florestal Brasileiro.

4.1. CONFECÇÃO DOS PAINÉIS LVLS

Foi utilizada resina sintética CR – 7010 à base de fenol-formaldeído de alta resistência à umidade para a confecção dos painéis. Algumas de suas propriedades e a formulação utilizada podem ser visualizadas na Tabela 04. A preparação do adesivo foi feita basicamente pela mistura de seus componentes (Tab. 05) em uma bateadeira industrial, por aproximadamente 15 minutos.

Tabela 04. Propriedades da resina fenol-formaldeído CR - 7010.

Aparência	Líquido Viscoso Avermelhado
Viscosidade a 25°C	550 - 850 cp
Sólidos a 105°C	48 - 50%
pH	12 - 13
Densidade a 25°C	1,200 - 1,250 g/cm ³

Fonte: Schenectady Crios, 1999 (Rio Claro-SP).

Tabela 05. Formulação do adesivo utilizado no projeto.

Composição	Partes
Resina CR – 7010	100
Farinha de Trigo (Comercial)	5
Farinha de Coco (Albex nº 9)	8
Água	5

Formulação sugerida pela Schenectady, 1999 Crios (Rio Claro-SP).

Após a preparação, a viscosidade do adesivo foi determinada por meio do equipamento Copo Ford nº 8 e verificou-se que estava dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante da resina.

Foram utilizadas lâminas de madeira com espessura de 2 mm, selecionadas visualmente conforme classificação da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada – ABIMCI, descrito por SANTOS (2008). Não foram utilizadas lâminas com uma quantidade excessiva de nós, com rachaduras profundas, assim como as lâminas com rugosidade excessiva. As lâminas selecionadas foram secas em prensa à quente a 110°C por 15 minutos e a uma pressão de 0,7 MPa com o intuito de reduzir o teor de umidade de 12% para 6 – 8% de umidade, conforme recomendação do fabricante do adesivo.

Após a secagem, as lâminas de madeira foram guilhotinadas em seções de 23 cm x 100 cm (larg. x comp.), para a posterior confecção dos painéis LVLs (Fig. 13-A).



Figura 13. Processos de confecção dos painéis LVLs, onde: A- Processo de esquadreamento das lâminas para a confecção dos painéis LVLs; B- sorteio das lâminas que formaram cada painel LVL; C- Aplicador de adesivo de rolos.

A montagem de cada painel LVL foi feita por meio de sorteio das 22 lâminas que o compuseram (Fig. 13-B), o que tornou o painel aleatorizado ou não-homogêneo (sem classificação das lâminas por classes de resistência). Posteriormente, a aplicação do adesivo às lâminas foi realizada por um aplicador de adesivo de rolos, em uma só face (linha simples) e com gramatura de 190 g/m² (Fig. 13-C). Foi realizada uma prensagem a frio para assemblagem das lâminas do colchão e em seguida, foi feita a prensagem à quente à 150°C e 2,8 MPa de pressão real por 45 minutos, de acordo com recomendações do fabricante do adesivo e seguindo-se uma adaptação da metodologia proposta por CARVALHO et al. (2004) para a cura do adesivo (maior temperatura e pressão).

Por fim, foram confeccionados quatro painéis com dimensões iguais a 23 x 4 x 100 cm (larg. x espes. x comp.), para cada espécie, onde após o esquadrejamento e acabamento final, os painéis foram seccionados em 5 corpos-de-prova (CP) de 4 x 4 x 96 cm (larg. x espes. x comp.), resultando em 20 CP para cada espécie.

Os corpos-de-prova foram dispostos em câmara de climatização, com temperatura e umidade controlada, permanecendo nesta condição por um período de aproximadamente dois meses até atingirem massa constante.

4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.2.1. Avaliação não-destrutiva (AND)

Neste estudo, o equipamento *Stress Wave Timer* da marca *Metriguard* modelo 239-A foi utilizado para determinar a velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) longitudinalmente através dos CP de LVL, assim como para calcular o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) de todos os corpos-de-prova, o que resultou em uma análise de 20 CP para cada espécie (PO e PK). Os CP possuíam dimensões de 4 x 4 x 96 cm (larg. x espes. x comp.) e vão entre sensores de 84 cm.

Para a avaliação com esse equipamento, utilizou-se o ganho máximo do aparelho, conforme utilizado por BRASHAW et al. (2004) para maximizar a sensibilidade no recebimento do sinal da onda de tensão.

Assim, fez-se a avaliação não-destrutiva para ambas as posições de ensaio, *flatwise* e *edgewise* conforme a Figura 14.

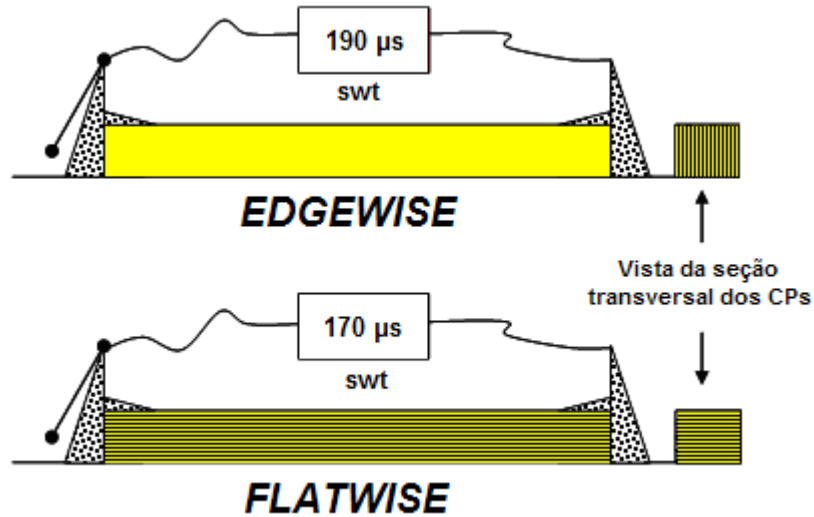


Figura 14. Exemplo esquemático da determinação do tempo de trânsito (t) da onda de tensão nas vigas de LVL segundo os eixos estruturais *edgewise* e *flatwise*. Fonte: SOUZA et al. (2008a).

Para fins de cálculo, a velocidade de propagação da onda (V_0), foi determinada para cada corpo-de-prova conforme Equação 1 e para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) utilizou-se a Equação 2, fornecida pelo fabricante do aparelho (DEL MENEZZI et al. 2008a).

$$V_0 = \frac{L}{t \times 10^{-6}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$E_{md} = \frac{v_o^2 \times D}{g} \times 10^{-5} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

E_{md} = módulo de elasticidade dinâmico, N/mm^2 ;

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

L = distância percorrida pela onda, m ;

$t =$ tempo de trânsito da onda, μs ;

$D =$ densidade aparente do painel, kg/m^3 ;

$g =$ aceleração da gravidade, $9,804 \text{ m/s}^2$;

4.2.2. Ensaio de resistência à flexão estática

Para o ensaio de resistência à flexão estática, o módulo de ruptura (f_m) e o módulo de elasticidade (E_m) foram determinados para a posição *flatwise* utilizando-se os mesmos CPs da avaliação não destrutiva, o que totalizou 15 CP para cada espécie.

Em caráter experimental, outros 5 CPs de mesmas dimensões foram avaliados em posição *edgewise*, no intuito de se investigar a relação existente entre as propriedades mecânicas e os eixos estruturais.

Foram utilizados os princípios da norma ASTM D 5456 (ASTM, 2006), específica para painéis de lâminas paralelas e seguiram-se os procedimentos da norma ASTM D 198 (ASTM, 1999a) para ambos os ensaios, nas posições *flatwise* e *edgewise* (Fig. 15).

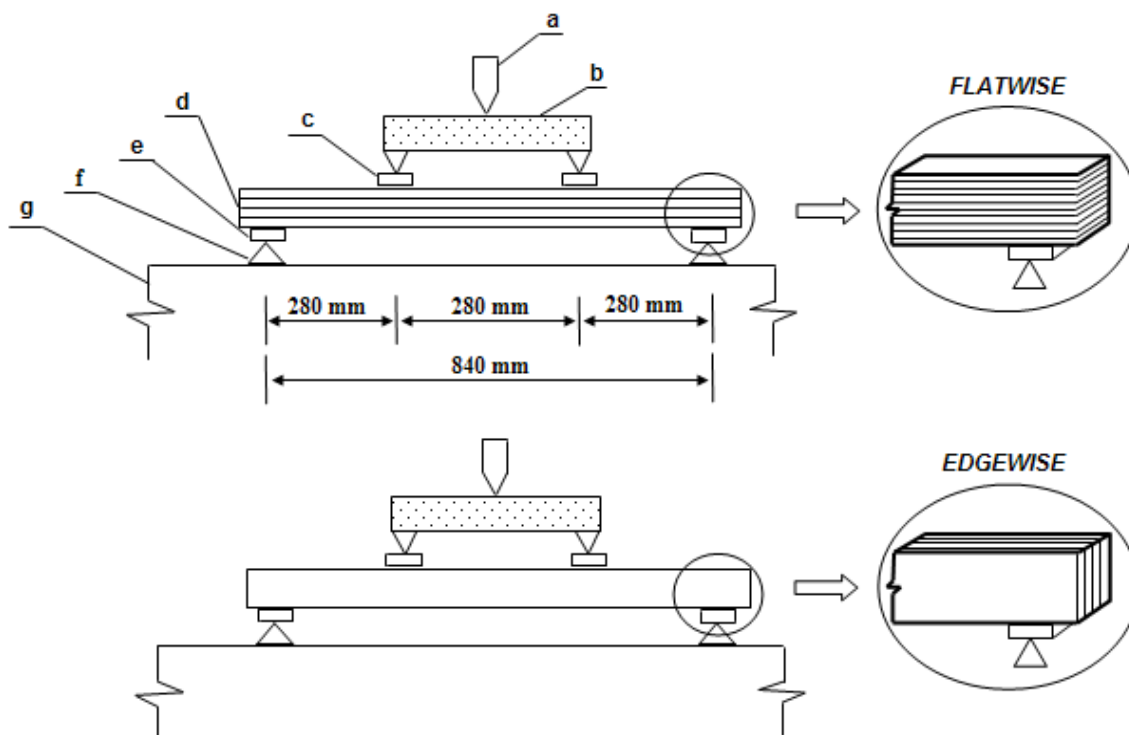


Figura 15. Esquema proposto para o ensaio de flexão estática e em destaque as posições de ensaio *flatwise* e *edgewise*, onde: a- célula de carga; b- distribuidor de carga; c- aplicadores de carga; d- corpo-de-prova (espessura); e- pratos suporte e rótulas de movimentação; f- apoios de reação; g- base da máquina. Fonte: modificado de ASTM, 2006.

A Tabela 06 resume os parâmetros utilizados para o ensaio de resistência à flexão estática.

Tabela 06. Parâmetros utilizados no ensaio de resistência à flexão estática em painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

Parâmetros do Ensaio de Resistência à Flexão Estática	
Dimensão dos Corpos-de-Prova (CP)	40 x 40 x 960 mm (larg. x espes. x comp.)
Vão total	840 mm
Razão L/e (comp./ espes.)	21 vezes
Distância dos Aplicadores de Carga	280 mm (cada terço do CP)
Velocidade de Carregamento	3,5 mm/min
Normas	ASTM D 5456 (ASTM, 2006) ASTM D 198 (ASTM, 1999a)
Propriedades Avaliadas	Módulo de Elasticidade (E_m) Módulo de Ruptura (f_m)

O módulo de elasticidade em flexão estática (E_m) foi calculado conforme a Equação 3 e no cálculo do módulo de ruptura (f_m), utilizou-se a Equação 4.

$$E_m = \frac{P \times a \times (3L^2 - 4a^2)}{4 \times b \times h^3 \times \Delta} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$f_m = \frac{3 \times P \times a}{b \times h^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

P = Máxima carga, N;

P' = Carga no limite proporcional, N;

L = Vão apoios, mm;

a = Distância entre aplicadores de carga, mm;

b = Largura do corpo-de-prova, mm;

h = Espessura do corpo-de-prova, mm;

Δ = Deformação da peça, mm.

4.2.3. Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras

O ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (Fig. 16) foi realizado de acordo com os procedimentos da norma ASTM D-5456 (ASTM, 2006) e ASTM D-198 (ASTM, 1999a).



Figura 16 Realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

Os CPs para este ensaio foram retirados dos topos de cada CP do ensaio de flexão estática, o que resultou em 20 CP de compressão paralela às fibras, para cada espécie. A dimensão dos CP foi determinada pela máxima relação comprimento/raio de giração (17 vezes) permitida pela norma ASTM D-5456 (ASTM, 2006), resultando em CP de 4 x 4 x 18 cm (larg. x espes. x comp.).

A velocidade de carregamento utilizada foi de 0,25 mm/min e a resistência à compressão paralela foi determinada de acordo com a Equação 5.

$$f_{c,0} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga de Ruptura (N);

A = Área (mm²)

Por último, os corpos-de-prova tiveram registrados os padrões de ruptura, e comparados com os tipos ilustrados na norma ASTM D 4761-96 (ASTM, 1996) (Fig. 17).

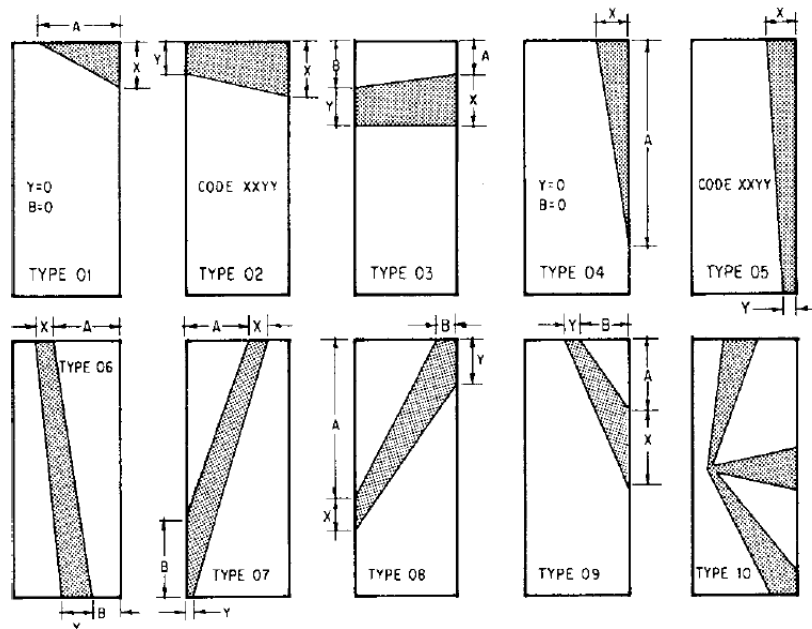


Figura 17. Tipos de rupturas conforme norma ASTM D 4761-96. Fonte: ASTM, 1996.

4.2.4. Ensaios de resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular

O ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular à linha de cola foi realizado de acordo com os procedimentos das normas ASTM D-5456 (ASTM, 2006) e ASTM D-1037 (ASTM, 1999b) e os CPs para este ensaio foram obtidos em três repetições por painel de cada espécie, totalizando 12 CP para o cisalhamento paralelo e 12 CP para o cisalhamento perpendicular.

Os CPs de cisalhamento paralelo e perpendicular foram obtidos dos topos dos CP de flexão estática. Assim, os CPs de ambos os ensaios (paralelo e perpendicular)

tiveram dimensões iguais a 40 x 40 x 63,5 mm (larg. x esp. x comp.), uma adaptação da espessura e largura determinada pela norma ASTM D-1037 (ASTM, 1999b), devido à limitação das dimensões do painel de onde os CPs foram obtidos (Fig. 18).

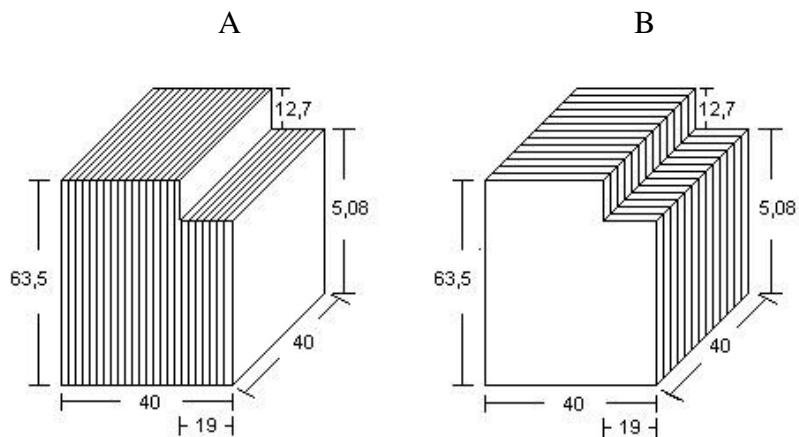


Figura 18. A) Corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo à linha de cola; B) Corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento perpendicular à linha de cola. Medidas em mm. Fonte: Adaptado de ASTM D 1037 (ASTM, 1999b).

A partir da Equação 6 e 7, determinaram-se as resistências dos painéis LVLs frente ao cisalhamento paralelo e perpendicular respectivamente:

$$f_{gv,0} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$f_{gv,90} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga de Ruptura (N);

A = Área (mm^2)

4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS

4.3.1. Ensaio de absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura

Para a realização dos ensaios de absorção de água (ABS), inchamento em espessura (IE) e taxa de não-retorno em espessura (TNRE) foram utilizados os princípios da norma ASTM D 1037 (ASTM, 1999b), de forma que três CPs com dimensões iguais a 4 x 4 x 4 cm (larg. x comp. x espes.) foram obtidos dos topos dos CP de flexão estática. Foi feita uma adaptação das dimensões determinadas pela norma ASTM D-1037 (ASTM, 1999b) que previa a largura e comprimento iguais a 30,4 cm, devido à limitação das dimensões do painel de onde os CPs foram obtidos e da disponibilidade do material. Desta forma, foram obtidos 12 CPs para cada espécie.

Cada CP teve, previamente, sua massa registrada assim como suas dimensões mensuradas com relógio comparador (Fig. 19-A). Estes foram dispostos submersos horizontalmente em água destilada (Fig. 19-B) à temperatura ambiente por período total igual a 96 horas, onde nos períodos de 2, 24 e 96 horas, a massa e dimensões foram mensuradas com balanças de precisão e relógio comparador. Os valores referentes à absorção de água e inchamento em espessura dos painéis foram avaliados em porcentagem da diferença entre a medição prévia e medição posterior à imersão em períodos de 2, 24 e 96 horas conforme Eq. 8 e 9, respectivamente:

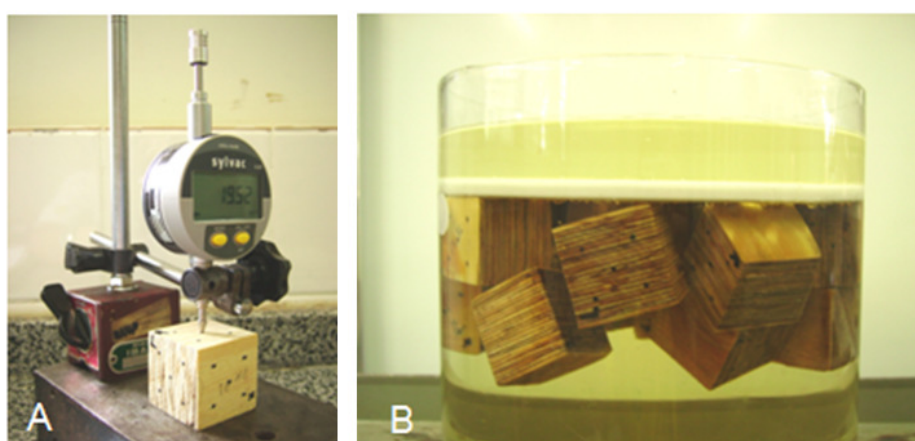


Figura 19. Equipamentos para determinação das propriedades físicas, onde: A- medição das dimensões dos CPs de LVL com relógio comparador para ensaio de absorção de água e inchamento em espessura; B- imersão em água dos CPs de LVL

$$ABS \% = \left(\frac{M_f - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$IE \% = \left(\frac{E_f - E_i}{E_i} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

M_i = Massa Inicial, anterior à imersão em água (g);

M_f = Massa Final, posterior à imersão em água (g);

E_i = Espessura inicial, anterior à imersão em água (mm);

E_f = Espessura Final, posterior à imersão em água (mm);

A taxa de não-retorno em espessura foi avaliada pela porcentagem da diferença entre a medição do período de 24 horas de imersão em água e a medição após climatização dos CPs a 12% conforme Equação 10:

$$TNRE \% = \left(\frac{E_f - E_i}{E_i} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

E_i = Espessura Inicial, posterior a 24 horas de imersão em água (g);

E_f = Espessura Final, posterior climatização dos CPs à 12% de umidade (g);

Ao final, fez-se a média da absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno para os 12 corpos-de-prova das duas espécies de *Pinus*, o que resultou no valor médio de cada propriedade para cada espécie.

4.3.2. Avaliação do gradiente vertical de densidade

Como não se tem uma norma específica para a determinação do gradiente vertical de densidade em painéis LVLs, esta propriedade foi avaliada por uma metodologia experimental (SOUZA et al. 2008b). Foram obtidos de cada painel 3 corpos-de-prova (CP) com dimensão igual a 4 x 4 x 4 cm (larg. x espes. x comp.) das duas espécie, resultando em 24 CP, onde 12 foram de *Pinus oocarpa* e 12 de *Pinus kesiya*. Inicialmente, todos os CP foram armazenados em câmara de climatização, até manutenção da massa constante e teor de umidade de 12%.

Assim, todos os CPs foram pesados em balança de precisão igual a 10^{-3} g e tiveram as dimensões aferidas por relógio comparador de precisão igual a 10^{-2} mm. Em seguida, utilizando-se de uma lixadeira rotatória de marcenaria da marca Invicta e lixa com granulometria comercial P100, os CP foram lixados sutilmente até a retirada de cerca de 1mm sucessivamente, sempre na posição *flatwise* com relação à lixa (Fig. 20).

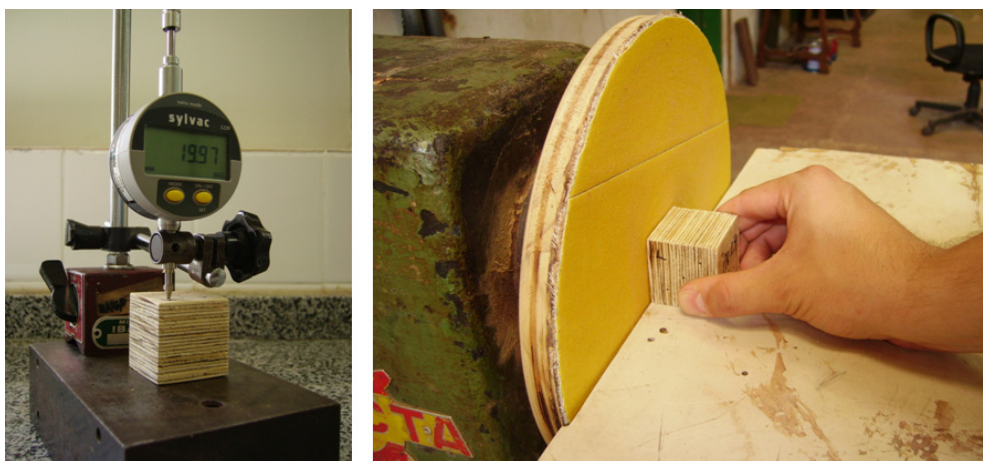


Figura 20. Processo de aferição das dimensões e de lixamento dos corpos-de-prova para a determinação do gradiente vertical de densidade.

Após cada operação de lixamento, os CP foram novamente pesados e tiveram suas dimensões aferidas por relógio comparador. Esse procedimento se repetiu por mais 25 vezes sucessivamente, totalizando ao final 26 medições, o que representou a metade de cada CP ou 20mm. A outra metade do CP representou o “espelho” das 26 medições iniciais, completando a espessura total do CP, permitindo a visualização do gradiente vertical de densidade.

Para cada medição, a densidade foi calculada partindo-se da relação existente entre a massa e volume, de acordo com a Eq. 11.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

ρ = densidade aparente; (g/cm³)

m = massa; (g)

v = volume; (cm³)

4.4. PROPRIEDADE BIOLÓGICA

4.4.1. Ensaio de biodeterioração

Para este ensaio, foram seguidos os procedimentos da norma ASTM D 2017 (ASTM, 2005). De cada painel das duas espécies (*Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*) foram utilizados, 15 CP de dimensões 2,5 x 2,5 x 0,9 (larg. x comp. x espes.), retirados dos topos dos CP de flexão estática e a partir da orientação *flatwise* (Fig. 21), totalizando 60 CPs. Desta forma, 24 CPs foram destinados à podridão branca, 24 CPs para podridão parda e 12 CPs para a testemunha (CPs do painel LVL sem nenhum tipo de biodeterioração). Utilizaram-se os fungos: *Trametes versicolor* (Linnaeus ex Fries) Pilát de podridão branca e *Gloeophyllum trabeum* (Person ex Fries.) Murrill de podridão parda.

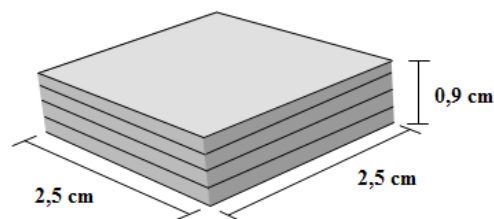


Figura 21. Corpo-de-prova, padrão ASTM D 2017/2005 (ASTM, 2005), utilizado para o ensaio de biodeterioração em laboratório.

Também foram preparados 12 CPs de *Pinus* spp. e 12 CP de *Cecropia* spp., os quais foram utilizados como madeira de referência, para a avaliação da viabilidade do ataque dos fungos, conforme recomendação da norma citada anteriormente.

O solo utilizado para a inoculação dos fungos foi coletado do horizonte “B” (em trincheira) na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB) e teve seu pH corrigido para um valor em torno de 4,0 - 5,5. A Capacidade de Retenção de Água no solo (CRA) foi calculada conforme determinação da norma ASTM D 2017 (ASTM, 2005), o que resultou em CRA entre 20-40%. O solo foi seco em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 12 horas e depois passado seco em uma peneira de 0,30-0,51 cm de abertura, para quebrar os torrões e retirar impurezas.

Nos frascos de vidro foram adicionados 31 ml de água para posterior adição de 72g de solo preparado. Posteriormente, uma placa suporte do alburno das madeiras de *Cecropia* spp. (para fungos de podridão branca) e de *Pinus* spp. (para fungos de podridão parda) com dimensões de 2,9 x 3,5 x 0,3 cm (larg. x comp. x espes.) foram dispostas sobre o solo. Os frascos de vidro foram parcialmente fechados e autoclavados em temperatura de 120°C por 30 min, para a esterilização do seu conteúdo.

Os fungos foram previamente cultivados em meio líquido Malte - Água destilada e acondicionados por um período de duas semanas em câmara incubadora com 75% de umidade relativa e temperatura entre $27 \pm 3^\circ\text{C}$, para a verificação de possível contaminação e de desenvolvimento adequado dos fungos. Posteriormente, as hifas dos fungos foram homogeneizadas no meio líquido por meio de aparelho liquidificador e desta solução foi obtido 1 ml para ser adicionada à placa suporte nos frascos de vidro.

Os frascos de vidro com o inóculo dos fungos permaneceram em câmara incubadora por um período de duas semanas e logo após este período, os CPs dos painéis LVLs foram dispostos sobre a placa suporte inoculada, para dar início ao ensaio de biodeterioração (Fig. 22).

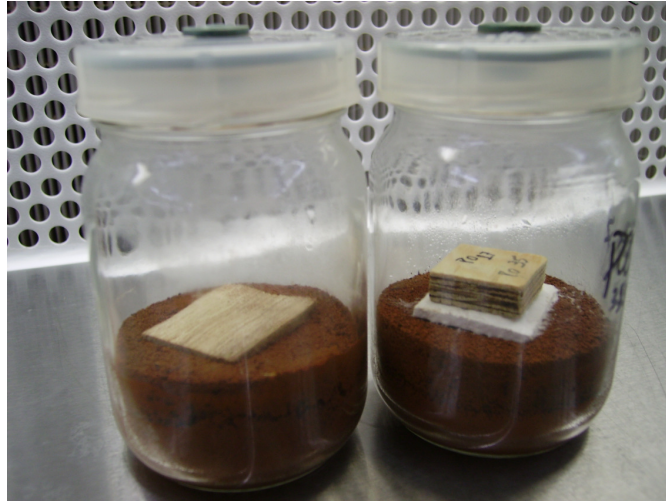


Figura 22. Frascos de vidros utilizados para inoculação dos fungos no ensaio de biodeterioração de painéis LVLs, onde: frasco de vidro com placa suporte, terra e água (esq.); e o mesmo material após a inoculação do fungo *Trametes versicolor* com corpo-de-prova de LVL para o ensaio acelerado em laboratório.

Os vidros inoculados foram mantidos por um período de 12 semanas em câmara incubadora com temperatura e umidade controlada (aproximadamente 28°C e umidade relativa de 75%). O cálculo da resistência dos CPs ao ataque dos fungos foi determinado por meio da perda de massa dos CPs a partir da Equação 12.

$$P_m(\%) = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

M_i = Massa inicial, antes do ataque dos fungos (g);

M_f = Massa final, após 12 semanas de ataque dos fungos (g).

Desta forma foi determinada a média da perda de massa para os painéis LVLs das duas espécies de *Pinus* e para as madeiras de referência *Pinus* spp. e *Cecropia* spp.

A avaliação da intensidade do ataque dos fungos foi feita a partir da Tabela 07, onde são apresentadas classes de resistências, de acordo com a norma ASTM D 2017

(ASTM, 2005), determinando-se a classe de resistência dos painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*.

Tabela 07. Classes de resistência à biodeterioração em função da perda de massa (%) dos corpos-de-prova, de acordo com a norma ASTM D 2017 (ASTM, 2005).

Perda de Massa (%)	Massa Residual (%)	Classe de Resistência
0 - 10	90 - 100	Altamente Resistente - AR
11 - 24	76 a 89	Resistente - R
25 - 44	5 a 75	Moderadamente Resistente - MR
45 ou mais	Menos de 56	Pouco ou Não Resistente - NR

4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi estabelecida com o auxílio do programa *SPSS* (*Statistical Package for the Social Sciences*) para *Windows*, v. 15, de acordo com o número de repetições e de tratamentos específicos para cada propriedade mecânica, física, biológica e na avaliação não destrutiva.

Comparou-se via análise de variância (Teste F) para ambas as espécies, as médias das propriedades tecnológicas: módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em flexão estática; módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}); velocidade de propagação de ondas de tensão (V_0); resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$); resistência ao cisalhamento paralelo ($f_{v,0}$) e perpendicular à linha de cola ($f_{v,90}$); absorção de água (ABS) para os períodos de 2, 24 e 96 horas; inchamento em espessura (IE) para os períodos de 2, 24 e 96 horas; taxa de não-retorno em espessura após 24 horas de imersão (TNRE); perda de massa em podridão parda (PM-PP) e podridão branca (PM-PB).

Para a predição das propriedades mecânicas a partir da avaliação não destrutiva, foi utilizado o delineamento experimental: 3 painéis para cada espécie (*Pinus kesiya* e *Pinus oocarpa*), resultando em 15 corpos-de-prova de cada espécie, que foram avaliados na posição “*flatwise*” (ver Fig. 6).

Assim, foram obtidas as médias para E_m no ensaio em flexão estática em máquina universal de ensaios INSTRON e E_{md} para ensaio não-destrutivo, com o *Stress Wave Timer*. As diferenças existentes entre estes ensaios foram determinadas pelo Teste F, a uma significância de 1 e 5%.

As correlações foram determinadas em nível de espécie, onde se analisou 15 amostras por espécie (15 amostras para *Pinus oocarpa* e 15 amostras para *Pinus kesiya*); Assim foi avaliado o coeficiente de determinação (R^2) e a significância dos parâmetros (Teste “F”). Com isso, foram gerados modelos de regressão simples $y = a + bx$, tendo o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) e a velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) como variáveis independentes (x) e o módulo de elasticidade e módulo de ruptura (E_m e f_m) como variáveis dependentes (y), com a finalidade de avaliar a adequação do E_{md} e V_0 como estimador das propriedades mecânicas E_m e f_m .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.1.1. Resistência à flexão estática

A Figura 23 apresenta os valores observados para a propriedade de rigidez (Módulo de Elasticidade – E_m) e de resistência (Módulo de Ruptura – f_m) dos painéis LVLs confeccionados com as duas espécies de *Pinus* em ambas as posições de ensaio. Foi observado que os painéis LVLs confeccionados com a espécie *Pinus kesiya* (PK) apresentaram propriedades mecânicas (E_m e f_m) superiores em comparação aos painéis de *Pinus oocarpa* (PO) na posição *flatwise*. A análise de variância mostrou que este comportamento foi significativo ao nível de 1% de significância (Tabelas 15 e 16 – Apêndice)

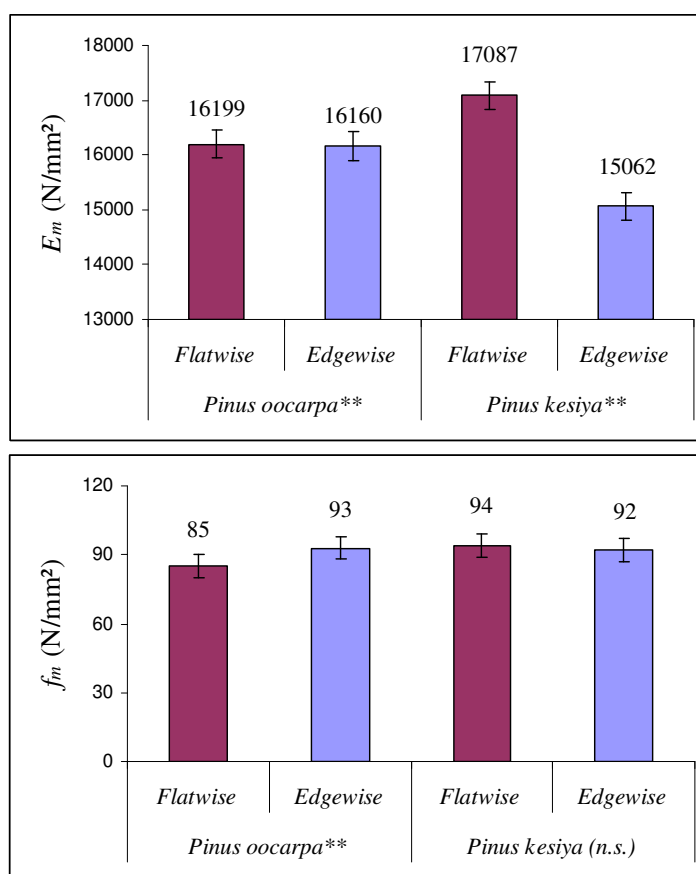


Figura 23. Comparação entre os valores do módulo de elasticidade (E_m) e do módulo de ruptura (f_m) nas duas posições de ensaio *flatwise* e *edgewise* para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, onde (**) – significativo ao nível de 1% e (n.s.) – não significativo ao nível de 5% de significância.

Por outro lado, foi observado que para a posição de ensaio *edgewise*, os painéis de PO se apresentaram significativamente superiores no E_m com relação aos painéis de PK sendo que para o f_m , não houve diferença significativa ao nível de 1%.

Compararam-se ainda as médias obtidas para as duas posições de ensaio (*flatwise* e *edgewise*). Foi observado que os valores do E_m na posição *flatwise* foram superiores em ambos os painéis de PO e PK. O mesmo comportamento foi observado para o f_m nos painéis de PK. Inversamente, foi observado que nos painéis de PO, os valores do f_m foram superiores na posição *edgewise*, comparativamente à posição *flatwise*. As análises de variância mostraram que a diferença entre as posições *flatwise* e *edgewise* nos painéis da espécie PK para a propriedade f_m não foi significativa ao nível de 1% de significância (Tabelas 17 e 18, Apêndice).

BENITES (2004) observou comportamento semelhante ao determinado para o f_m nos painéis de PO, onde a posição *edgewise* se mostrou superior aos resultados de *flatwise*. Segundo o autor, em painéis LVLs confeccionados com a espécie *Eucalyptus grandis* foram observados os valores de 96,4 N/mm² na posição *edgewise* e de 72,4 N/mm² para *flatwise* e para os painéis LVLs da espécie *Pinus elliottii*, 56,1 N/mm² e 50,2 N/mm², respectivamente.

Neste contexto, o presente trabalho mostrou que os painéis LVLs confeccionados com lâminas de PO e PK estão dentro dos valores de resistência e rigidez observados na literatura. De forma ilustrativa, a Tabela 08 resume alguns resultados do E_m e f_m em painéis LVLs, apesar das diferentes espécies de madeira utilizadas, diferentes adesivos e variadas formas de confecção dos painéis LVLs.

Tabela 08. Comparação entre resultados da literatura e os obtidos neste estudo para o módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m).

Autor	Espécie	Adesivo	Gram. (g/m ²)	Espes. das lâminas (mm)	E_m (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)
Aydin et al. (2004)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	UF	180	1,6	9411,2 ^{n.i.}	94,9 ^{n.i.}
		PVA			8989,6 ^{n.i.}	90,5 ^{n.i.}
	<i>Fagus orientalis</i>	UF	160	2,1	19512,2 ^{n.i.}	118,3 ^{n.i.}
Killic et al. (2006)	<i>Alnus glutinosa</i>	PVA	180	2	10319,3	88,1
		PU	250		8411,6	86,0
		PVA	180	4	4650,3	56,7
		PU	250		4557,0	53,4
Lee et al. (1999)*	<i>Liriodendron tulipifera</i>	FF	n.i.	0,42 a	12200,0 ^e	73,0 ^e
			n.i.	0,32 b	14800,0 ^e	80,9 ^e
			n.i.	0,32 c	14880,0 ^e	81,5 ^e
Carvalho et al. (2004)	Híbrido <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	FF	190	3	13792,0 ^e	59,0 ^e
				3	12917,0 ^f	55,0 ^f
Gungor et al. (2006)	<i>Pterocarya fraxinifolia</i>	FF	180	2,3	9541,0 ^{n.i.}	87,8 ^{n.i.}
Kamala et al. (1999)	<i>Hevea brasiliensis</i>	FF	n.i.	n.i.	9144,0 ^{n.i.}	85,3 ^{n.i.}
				madeira sólida	8852,1 ^{n.i.}	64,7 ^{n.i.}
Pesquisa atual	<i>Pinus oocarpa</i>	FF	190	2	16199,4 ^e	84,9 ^e
	<i>Pinus kesiya</i>	FF			17086,9 ^f	94,0 ^f

Onde: a: LVL com emenda tipo *scarf joints*; b: LVL com emenda tipo *crushed-lap joints*; c: LVL sem emendas; (e): resultado para *edgewise*; (f): resultado para *flatwise*; (n.i.): não informada; UF- uréia-formaldeído; PVA- polivinilacetato; PU- poliuretano; FF- fenol-formaldeído; RF- resorcinol-formaldeído.

SANTOS (2008) avaliou o efeito de emendas em peças de LVL em posição *flatwise*, confeccionadas com a espécie *Pinus kesiya* e adesivo fenol-formaldeído e de seção transversal 40 x 40 mm, onde foram observados valores do E_m iguais a 15644, 16373 e 18222 (N/mm²) para as emendas do tipo macho-fêmea, bisel 2:1 e bisel 4:1, respectivamente. No caso do f_m , o autor observou os valores de 19,6; 18,6 e 40,1 (N/mm²), respectivamente.

PIO (2002) verificou as propriedades mecânicas de painéis LVLs em posição *flatwise* confeccionados com *Eucalyptus grandis* com lâminas obtidas de árvores com 15 e 20 anos de idade e classificadas em diferentes classes de resistência e observou que o E_m apresentou valores entre 8588,12 e 10121,2 (N/mm²) na idade de 15 anos e entre

9523,51 e 10346,2 (N/mm²) na idade de 20 anos. Já para o f_m , foram observados valores entre 89,05 e 118,48 (N/mm²) para os LVL na idade 15 anos e entre 98,95 e 156,61 (N/mm²) na idade 20 anos.

5.1.2. Resistência à compressão paralela às fibras

A Figura 24 apresenta os valores médios da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) em painéis LVLs confeccionados com as espécies PO e PK. Observou-se que, há uma sutil diferença entre os valores de $f_{c,0}$ para os LVLs das duas espécies de *Pinus*, onde os painéis LVLs confeccionados com a espécie PK apresentaram valores superiores aos painéis de PO. De acordo com a análise de variância, observou-se que esta diferença é estatisticamente significativa ao nível de 1% de significância (Tabela 19, Apêndice).

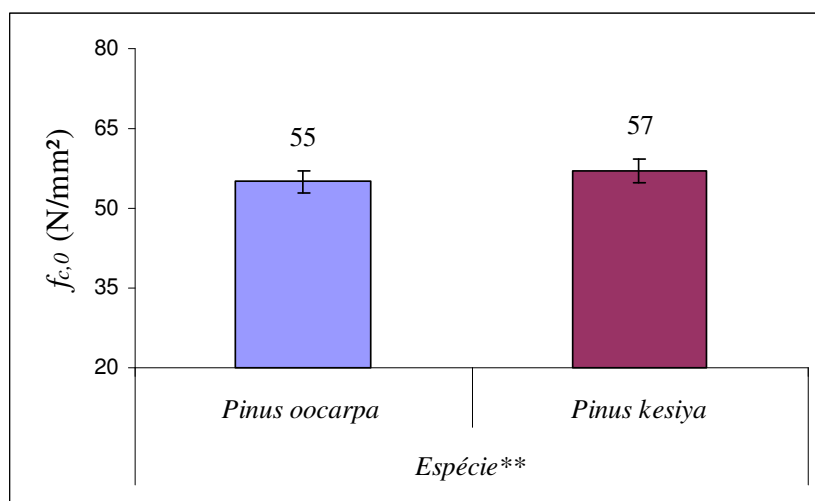


Figura 24. Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) em painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, onde (**) – significativo ao nível de 1% de significância.

A avaliação das rupturas observadas nos painéis LVLs das duas espécies de *Pinus*, comparadas às descritas na norma ASTM D 4761-96 (ASTM, 1996) (ver Fig. 17) revelou um padrão de ruptura do tipo 2, conforme pode ser visualizado na Figura 25.

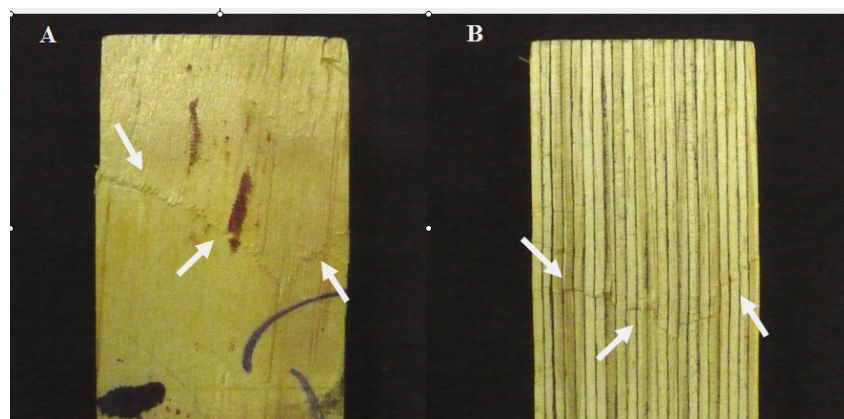


Figura 25. Padrão de ruptura observado para painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya* em ensaio de compressão paralela às fibras. Onde: A: vista frontal do corpo-de-prova (CP), caracterizando o padrão de ruptura do tipo 2 (ASTM, 1996); e B: vista lateral do CP, ilustrando a propagação da ruptura.

Comparativamente, KAMALA et al. (1999) estudando as propriedades mecânicas de painéis LVLs confeccionados com lâminas de seringueira (*Hevea brasiliensis*), observaram o valor da resistência à compressão paralela às fibras igual a 48,3 N/mm².

Em outro estudo semelhante, AYDIN et al. (2004) compararam o efeito da espécie *beech* (*Fagus orientalis*) e eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) na composição de painéis LVLs e assim foram observados valores de 55,3 N/mm² para a espécie *beech* e de 51,7 e 47,1 N/mm² para o eucalipto (em adesivo uréia-formaldeído e PVAc, respectivamente).

Segundo PIO (2002), que estudou painéis LVLs confeccionados com a espécie *Eucalyptus grandis*, onde as lâminas foram providas de toras com idades de 15 e 20 anos e classificadas em classes de resistência, foram observados valores entre 56,93 e 73,49 (N/mm²) nas três classes de resistência da idade de 15 anos e valores entre 72,59 e 86,16 (N/mm²) nas três classes de resistência da idade de 20 anos. Segundo o autor, provavelmente o que provocou esta diferença entre os resultados nas duas idades foi a densidade dos painéis confeccionados devido à diferença na densidade da madeira de origem, onde possivelmente a madeira com idade de 15 anos apresentou maior proporção de lenho juvenil, reduzindo a densidade do LVL desta idade.

Já para GABRIEL (2007) estudando painéis LVLs confeccionados com 25 lâminas de *Pinus caribaea* (var. *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*) e *Pinus oocarpa* classificadas em classes de resistência, verificou que a resistência à compressão paralela

chegou a 66,5 N/mm² nos painéis com lâminas de maior módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}). Nos painéis com lâminas de menor E_{md} foi observado o valor de 48,19 N/mm², no painel com distribuição racional (melhores lâminas nas faces) 50,59 N/mm² e para o painel alternado 57,82 N/mm².

Comparativamente, como nos estudos de GABRIEL (2007) foram utilizadas lâminas de madeira do gênero *Pinus*, constatou-se que os valores observados para a presente dissertação foram satisfatórios, visto que não houve classificação prévia das lâminas para a confecção dos painéis. Ainda, os valores observados para a resistência à compressão paralela no presente trabalho estão de acordo com a literatura.

No caso dos painéis LVLs confeccionados com as duas espécies de *Pinus* neste presente estudo, uma possível explicação para a diferença existente entre a resistência à compressão paralela às fibras dos painéis das duas espécies está com relação ao arranjo anatômico diferenciado nas duas espécies, visto que a densidade aparente dos painéis foi bastante semelhante (0,717 g/cm³ nos LVL de *Pinus oocarpa* e 0,712 g/cm³ nos LVL de *Pinus kesiya*) (SOUZA et al. 2008b).

5.1.3. Resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular à linha-de-cola

A Figura 26 apresenta os valores do cisalhamento paralelo ($f_{gv,0}$) e perpendicular ($f_{gv,90}$) às linhas de cola, observados nos painéis LVLs confeccionados com as espécies PO e PK. Percebeu-se que, apesar da sutil superioridade nos valores do $f_{gv,0}$ para os painéis de PK comparativamente aos painéis de PO, não houve diferença significativa ao nível de 1% de significância para esta propriedade entre as espécies estudadas. O mesmo comportamento foi observado para o $f_{gv,90}$, onde também não foi observado diferença significativa ao nível de 1 % (Tabelas 20 e 21, Apêndice).

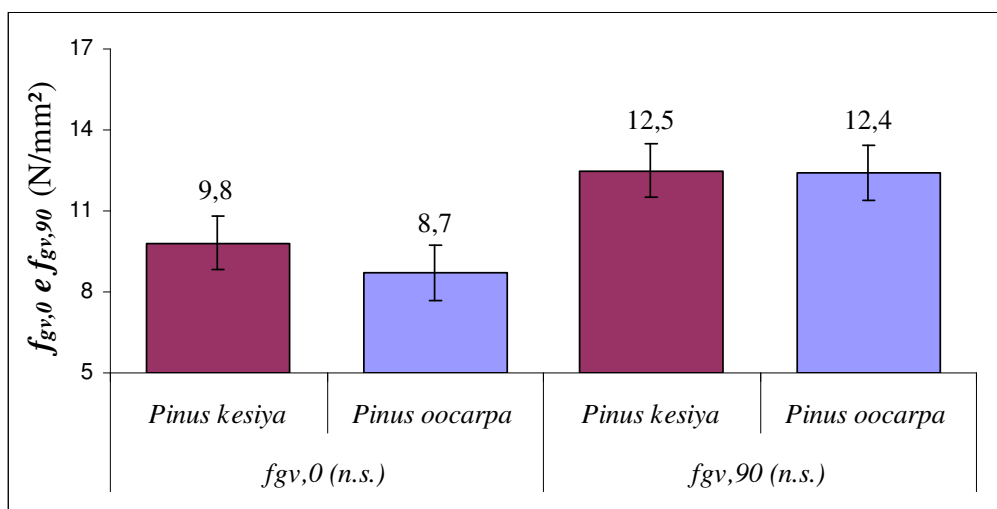


Figura 26. Valores médios da resistência ao cisalhamento paralelo ($f_{gv,0}$) e perpendicular ($f_{gv,90}$) às linhas de cola em painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, onde (n.s.) – não significativo ao nível de 5% de significância.

A análise da ruptura ao cisalhamento paralelo indicou que a mesma ocorreu nas lâminas de madeira, revelando a forte resistência do adesivo estrutural fenol-formaldeído, utilizado na confecção dos painéis (Fig. 27).

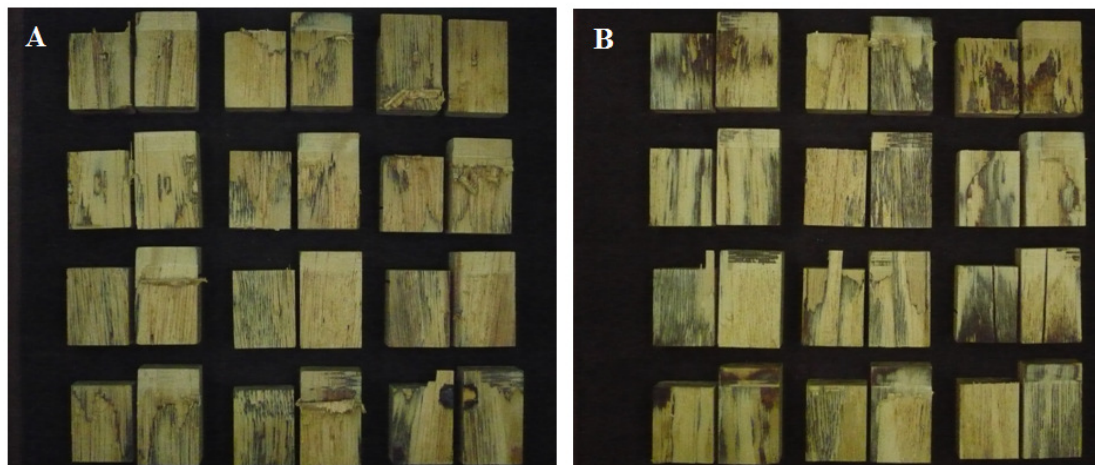


Figura 27. Análise da ruptura em cisalhamento paralelo à linha de cola para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* (esq.) e *Pinus kesiya* (dir.).

A escolha do adesivo parece ser uma condição primordial para a boa qualidade da linha de cola, refletindo em altos valores para a resistência ao cisalhamento paralelo ($f_{gv,0}$). SHUKLA e KAMDEN (2008), utilizaram o adesivo PVAc para confeccionar painéis LVLs de *silver maple*, *yellow poplar* e *aspen* e observaram baixos valores de

$f_{gv,0}$. Segundo os autores, foram observados os valores iguais a 2,52; 1,84 e 2,23 N/mm² para os painéis LVLs das espécies citadas, respectivamente.

Entretanto, na utilização de adesivos estruturais, como é o caso dos adesivos fenólicos, baixos valores do $f_{gv,0}$ podem ser observados, dependendo da espécie de madeira utilizada. GUNGOR et al. (2006) utilizaram adesivo à base de fenol-formaldeído e lâminas de *Pterocarya fraxinifolia* para a confecção de painéis LVLs e observaram o valor de 2,86 N/mm² para o cisalhamento paralelo à linha de cola. Segundo os autores, a densidade da madeira de origem era da ordem de 0,3-0,48 g/cm³, o que pode ter influenciado esta propriedade.

KAMALA et al. (1999) estudaram painéis LVLs confeccionados com lâminas de seringueira (*Hevea brasiliensis*) e adesivo fenol-formaldeído e observaram os seguintes resultados: paralelamente à linha de cola, o cisalhamento foi de 9,4 N/mm² e perpendicularmente, igual à 10,5 N/mm². Neste estudo, os valores da resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular foram comparados ao da madeira sólida de teca (*Tectona grandis*), onde se observou 7,6 e 9,2 N/mm² respectivamente.

Comparativamente aos estudos de GABRIEL (2007), que estudou painéis LVLs confeccionados com 25 lâminas de *Pinus caribaea* (var. *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*) e *Pinus oocarpa* classificadas em classes de resistência e adesivo fenol-formaldeído, verificou-se que a resistência ao cisalhamento paralelo apresentou valor médio igual a 9,86 N/mm² nos painéis com lâminas de maior módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) sendo estatisticamente igual ao painel com lâminas de menor E_{md} onde foi observado o valor de 10,11 N/mm². Já para o painel com distribuição racional (melhores lâminas nas faces) foi observado o valor médio correspondente a 9,07 N/mm² e estatisticamente igual ao painel alternado que se mostrou com 8,99 N/mm² nesta propriedade.

SANTOS (2008) estudou os painéis LVLs da espécie *Pinus kesiya* confeccionados de forma semelhante ao desta dissertação e observou o valor médio para o cisalhamento paralelo à linha de cola igual a 10,3 N/mm².

Avaliando-se o cisalhamento paralelo e perpendicular em painéis LVLs confeccionados com outras espécies de madeira, PIO (2002) verificou que utilizando lâminas da madeira de *Eucalyptus grandis* com idades de 15 e 20 anos e classificadas em classes de resistência, são observados valores médios entre 11,64 e 11,91 N/mm²,

respectivamente, para a idade de 15 anos e entre 15,10 e 15,73 N/mm², respectivamente, para a idade 20 anos.

Ainda segundo este autor, a diferença na densidade entre os painéis das duas idades foi decisiva para a diferença na resistência ao cisalhamento paralelo. Foi confirmado um ganho percentual de aproximadamente 32% quando se aumentou a densidade devido à idade da madeira (15 para 20 anos).

5.1.4. Avaliação não-destrutiva (AND)

5.1.4.1. Efeito da espécie e do eixo estrutural na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) e no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}).

Com o intuito de se verificar a influência do eixo estrutural na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) e no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) nos painéis LVLs confeccionados com PO e PK, fez-se a análise nas posições *flatwise* e *edgewise* (ver Fig. 06).

A Figura 28 apresenta os valores médios da V_0 para os LVL nas espécies e posições avaliadas. Observou-se a tendência de V_0 ser maior na posição *flatwise* (4775 m/s) que na posição *edgewise* (4687 m/s) e superior para a espécie PK (4946 m/s) frente à PO (4860 m/s). Tais diferenças foram estatisticamente significativas, como mostram as Tabelas 22 e 23, Apêndices.

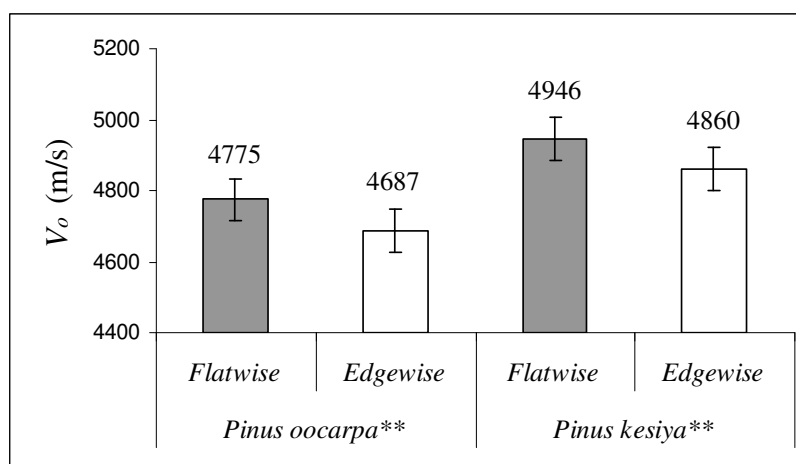


Figura 28. Médias da velocidade de propagação das ondas de tensão V_0 (m/s) nos painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, conforme posição de ensaio avaliada, onde (**) – significativo ao nível de 1% de significância.

Por consequência da maior V_0 no eixo *flatwise* e para os painéis LVLs da espécie PK, o E_{md} também foi maior para esta posição e nesta espécie. Este comportamento ocorre devido a uma relação direta entre a V_0 e o E_{md} , ou seja, aumentando-se a V_0 , têm-se um aumento no E_{md} (ver Eq. 1).

A Figura 29 mostra o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para as posições *flatwise* e *edgewise*, assim como para os dois tipos de painéis LVLs.

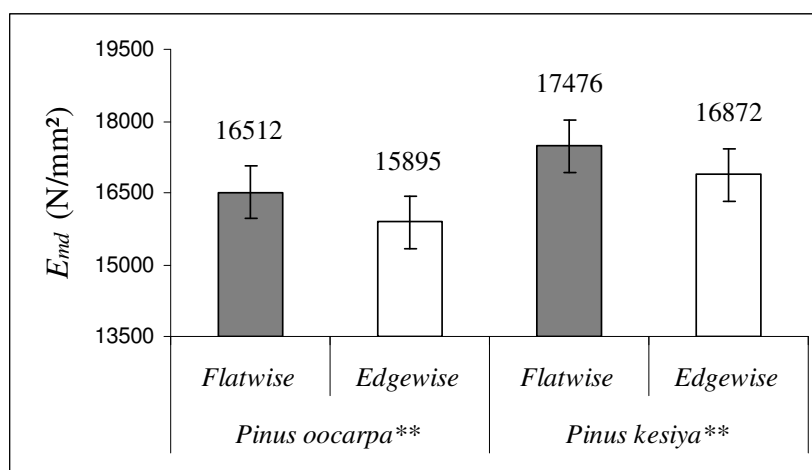


Figura 29. Médias do módulo de elasticidade dinâmico E_{md} (N/mm²) para os LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, conforme posição avaliada, onde (***) – significativo ao nível de 1% de significância.

De fato, segundo a análise de variância realizada (Tabelas 24 e 25, Apêndice) as diferenças observadas entre as posições e espécies foram significativas ao nível de 1% de significância. Os resultados apontaram que existe efeito da espécie. Desta forma, verificou-se que a média total de V_0 (m/s) para os painéis LVLs confeccionados com a espécie PK foi superior ao LVL confeccionado com PO. Essa diferença ocorreu mesmo diante do fato de que as espécies apresentaram, em média, o mesmo teor de umidade (12%) e densidades muito próximas, 0,717 g/cm³ para LVL de *Pinus oocarpa* e 0,712 g/cm³ para LVL de *Pinus kesiya* (SOUZA et al. 2008b)

Nesse sentido, possivelmente, esta diferença entre as médias de V_0 para o efeito da espécie está relacionada à organização celular (traqueídes e fibrotraqueídes), fazendo com que ocorra uma diferença na propagação da onda de tensão, reduzindo a velocidade da onda (V_0) na espécie *Pinus oocarpa* visto que os fatores que poderiam influenciar nesta propriedade (densidade e teor de umidade do painel) foram controlados.

Comparativamente, BRASHAW et al. (2004) observaram o valor de 4500 (m/s) para a V_0 em lâminas de *Pinus* sp. a 17% de umidade. Para compostos à base de madeira, avaliados por HAN et al. (2006), observou-se que painéis OSB apresentaram V_0 em média de 2778 (m/s), painéis compensados de 4322 (m/s) e painéis aglomerados de 1870 (m/s). Ainda segundo este autor, a descontinuidade do material, como ocorre nos painéis OSB e aglomerados, poderia dissipar a onda de tensão, fazendo com que aumentasse o tempo de propagação da onda e assim, reduzir a V_0 .

Nos estudos de GABRIEL (2007), que estudaram a V_0 em painéis LVLs confeccionados com diferentes variedades da espécie *Pinus caribae* (var. *caribae*, *bahamensis* e *hondurensis*) e *Pinus oocarpa* de 25 lâminas, foram observados valores de V_0 iguais a 4470 m/s para os LVLs com lâminas classificadas com menor E_{md} e V_0 próximos a 5158 m/s para os LVL com lâminas de maior E_{md} .

Com relação ao efeito da posição de ensaio, constatou-se que para os painéis LVLs das duas espécies de *Pinus* de uma forma geral, a média de V_0 para a posição *flatwise* é levemente superior à média de V_0 para a posição *edgewise*, onde se observaram os valores de 4859 m/s e 4774 m/s respectivamente (Fig. 30).

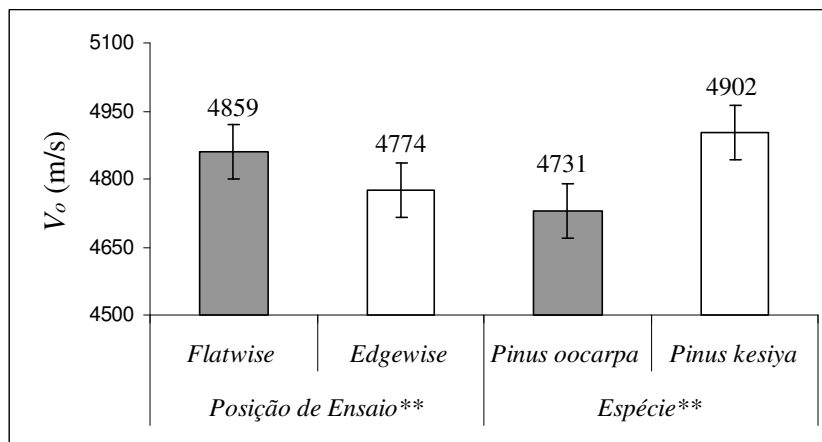


Figura 30. Médias da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0 - m/s) agrupadas de acordo com a posição de ensaio e a espécie avaliada, onde (**): significativo ao nível de 1%).

Da mesma forma, foram observados maiores valores do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) na posição *flatwise* (16994 N/mm²) que na posição *edgewise* (16384 N/mm²) para os LVLs de PO e PK e média superior para os LVL da espécie PK, comparativamente a espécie PO (17174 e 16204 N/mm², respectivamente) (Fig. 31).

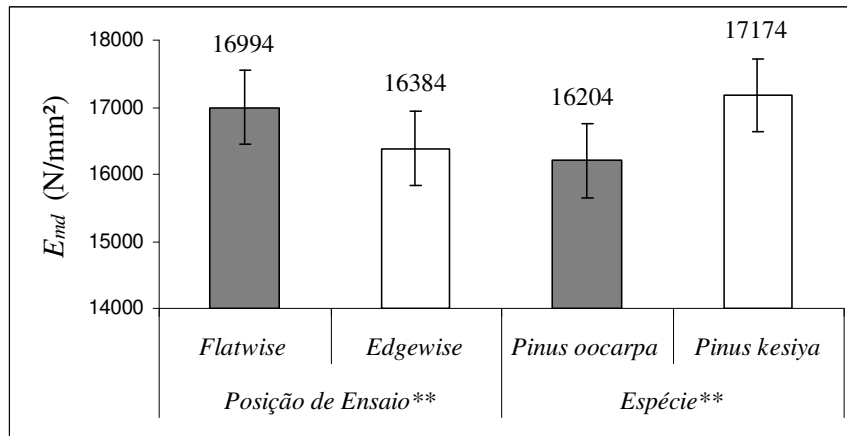


Figura 31. Médias do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md} – N/mm²) agrupados de acordo com a posição de ensaio e a espécie avaliada, onde (**): significativo ao nível de 1%).

Segundo GABRIEL (2007), comparando-se a posição *flatwise* com a *edgewise* em painéis LVLs confeccionados com madeira de *Pinus caribae* (var. *caribae*, *bahamensis* e *hondurensis*) e *Pinus oocarpa*, os resultados observados estabelecem uma relação oposta aos apresentados aqui, embora naquele estudo, tenha havido uma classificação das lâminas para se confeccionar os painéis LVLs. A V_0 e o E_{md} para as diferentes classificações são maiores na posição *edgewise*. Tais resultados estão resumidos na Tabela 09.

Tabela 09. Relação existente entre a velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) e o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para as posições de ensaio *flatwise* e *edgewise*. Fonte: GABRIEL, 2007.

Classificação	V_0 (m/s)		E_{md} (N/mm ²)	
	<i>Flatwise</i>	<i>Edgewise</i>	<i>Flatwise</i>	<i>Edgewise</i>
Lâminas de maior E_{md}	5158	5348	19681	21213
Lâminas de menor E_{md}	4470	4596	13030	13865
Racional	4746	4848	14715	15408
Alternado	5133	5267	18348	19653

Onde: Racional: 12 lâminas de maior E_{md} , onde 6 na face e 6 na contra-face e 13 lâminas de menor E_{md} no miolo; e Alternado: uma lâminas de maior E_{md} seguida de uma com menor E_{md} .

Acredita-se que a V_0 e o E_{md} sejam superiores na posição *flatwise* em relação a *edgewise* devido ao processo de confecção dos painéis LVLs, onde a prensagem a altas

temperaturas e altas pressões para a cura do adesivo e união das lâminas de madeira, causa densificação nas camadas externas do painel, aumentando a rigidez destas porções (CARVALHO et al, 2004). Por outro lado, nas camadas centrais a densidade do material não é muito alterada pela ação do calor (GABRIEL, 2007). Essa densificação nas camadas externas do painel faz com que, no material mais coeso, as ondas de tensão se desloquem com maior velocidade (V_0). Este resultado se reflete na posição *flatwise* da avaliação não-destrutiva, fazendo com que se observe maior V_0 (m/s) nesta posição.

Por este motivo, quando a média de V_0 (m/s) foi analisada dentro do efeito da espécie, este estudo mostrou que há um mesmo comportamento, onde a velocidade de propagação da onda de tensão (V_0) para a posição *flatwise* foi sempre superior à posição *edgewise*, independentemente da espécie de madeira utilizada na confecção dos painéis LVLs. Este comportamento foi comprovado pela análise de variância, onde se observou que não existe qualquer tipo de interação entre o efeito da espécie e o efeito da posição de ensaio (Fig. 32), ou seja, o comportamento de V_0 em determinada posição independe da espécie.

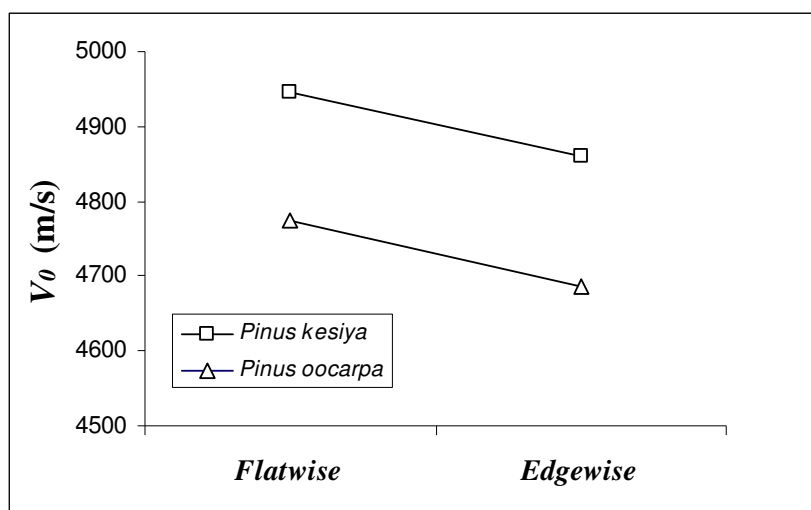


Figura 32. Comportamento da média da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0 - m/s) para as posições *flatwise* e *edgewise* comparativamente entre as espécies *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

Conforme citado anteriormente, pela relação direta existente entre a velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) e o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}), observou-se o mesmo comportamento para a V_0 , ou seja, para qualquer espécie de

madeira utilizada nos painéis LVLs (*Pinus oocarpa* ou *P. kesiya*), o E_{md} será maior para a posição *flatwise* comparando-se à *edgewise* (Fig. 33).

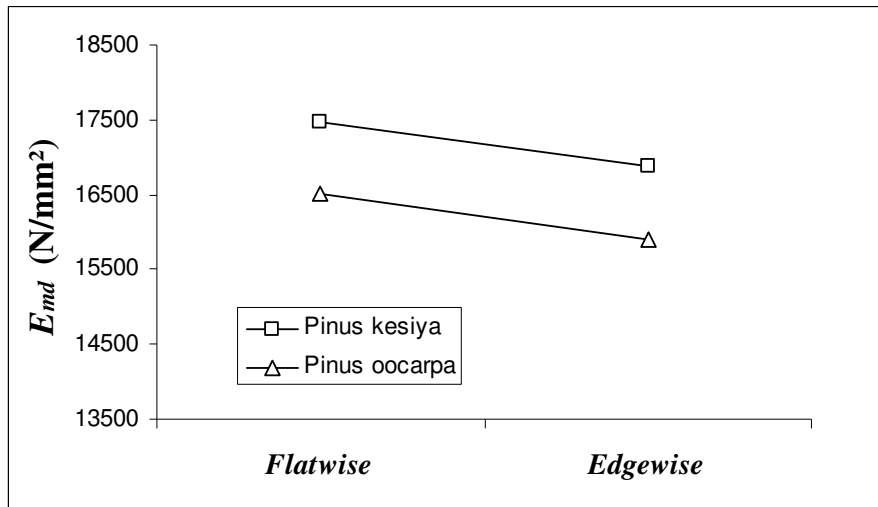


Figura 33. Comportamento da média do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md} – N/mm²) para as posições *flatwise* e *edgewise* comparativamente entre os painéis LVLs das espécies *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

5.1.4.2. Predição das propriedades mecânicas pela avaliação não-destrutiva

A Figura 34 apresenta as análises de regressão obtidas para a predição do E_m e f_m em função do E_{md} para os painéis LVLs confeccionados com a espécie PO.

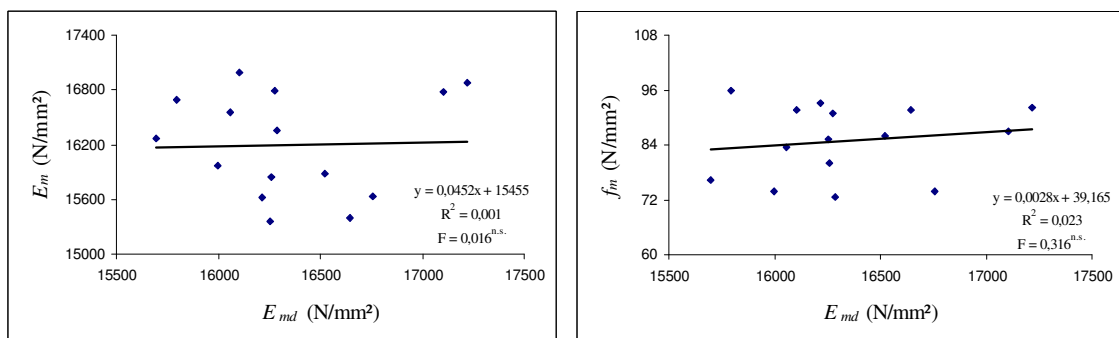


Figura 34. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa*, onde (n.s.) – não significativo ao nível de 5% de significância.

Destaca-se que estas análises de regressão não foram significativas ao nível de 1% de significância e os coeficientes de determinação foram extremamente baixos (Tabelas 26 e 27, Apêndice).

Já para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de PK, as análises de regressão obtidas para a predição do E_m e f_m em função do E_{md} apresentaram coeficiente de determinação superior (Fig. 35), apesar de que apenas a regressão E_m em função de E_{md} ter sido significativa ao nível de 1% (Tabela 28 e 29, Apêndice).

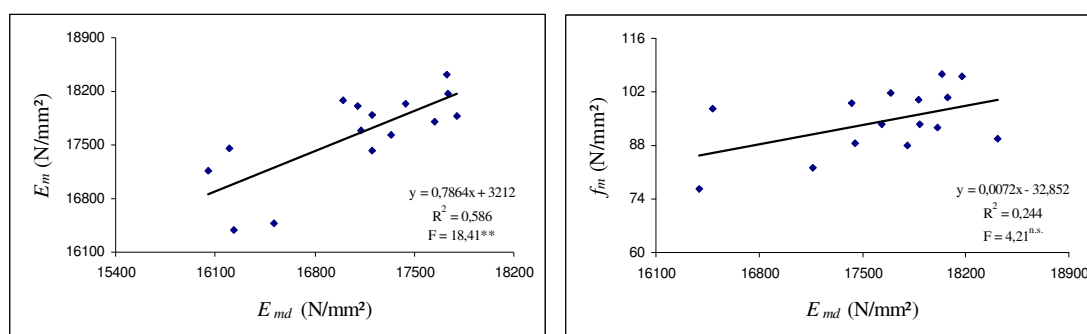


Figura 35. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função do módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus kesiya*, onde (**) – significativo ao nível de 1% de significância e (^{n.s.}) – não significativo ao nível de 5% de significância.

Por outro lado, as Figuras 36 e 37 apresentam à utilização da V_0 para predizer as propriedades mecânicas E_m e f_m . Foi observado que não houve melhora na relação entre a V_0 e as propriedades mecânicas, comparando-se com a utilização do E_{md} , onde foi observado um coeficiente de determinação igual a 1,6% e 4,9% para a relação com E_m e f_m respectivamente nos LVLs de PO e 47,6% e 19,9%, respectivamente nos LVL de PK. Destaca-se que apenas a regressão entre a V_0 e o E_m nos painéis LVLs de PK foi significativa ao nível de 1% (Tabelas 30 a 33, Apêndice).

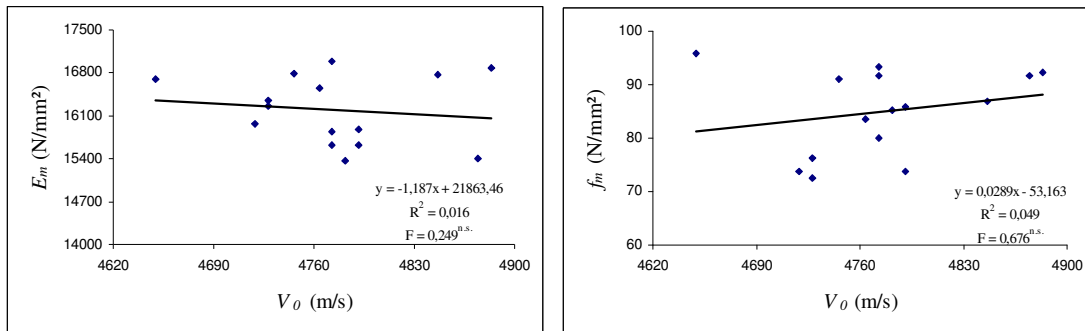


Figura 36. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa*, onde (^{n.s.}) – não significativo ao nível de 5% de significação.

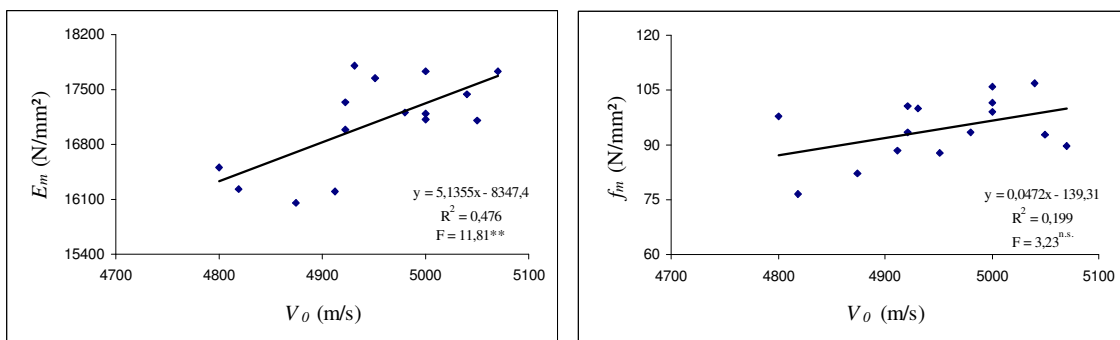


Figura 37. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) em função da velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus kesiya*, onde (**) – significativo ao nível de 1% e (^{n.s.}) – não significativo ao nível de 5% de significância.

Conforme pode ser observado em SANTOS (2008), que avaliou painéis LVLs confeccionados com a espécie *Pinus kesiya* para flanges de vigas de seção “I”, a relação existente entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) e o módulo de elasticidade obtido por ensaio estático (E_m) apresentou um coeficiente de determinação da regressão de 51,97% ($R^2 = 0,5197$), significativo ao nível de 5% probabilidade, sendo portanto satisfatórias segundo aquele autor.

Ao contrário do apresentado por SANTOS (2008), os dados aqui levantados mostraram que as relações existentes entre a V_0 ou o E_{md} e as propriedades mecânicas de painéis LVLs de PO e PK (E_m e f_m) não foram satisfatórias, ora pela não significância dos coeficientes, ora pelo baixo coeficiente de determinação da regressão.

Tal motivo pode estar ligado a não pré-classificação das lâminas em classes de qualidade e assim na não homogeneização durante a confecção do painel, ou seja, não

houve classificação prévia das lâminas que iriam compor cada painel. Optou-se em montar cada painel totalmente aleatorizado, na busca de se utilizar, de forma mais simples, o material disponível. Provavelmente, caso a opção fosse classificar as lâminas em classes de resistência, haveria uma melhor resposta nas relações existentes entre a avaliação não-destrutiva e os métodos tradicionais.

Em situação contrária ao desta pesquisa, GABRIEL (2007) verificou as relações existentes entre o E_{md} e E_m e também entre a V_0 e E_m em painéis LVLs com 25 lâminas pré-classificadas e observou altos coeficientes de determinação. Neste estudo foi utilizado adesivo fenol-formaldeído e lâminas de *Pinus caribae* (var. *caribae*, *bahamensis* e *hondurensis*) e *Pinus oocarpa* classificadas conforme Tabela 12. e foram observados na posição *flatwise* coeficientes de determinação da regressão de 69,6% na predição do E_m em função do E_{md} e de 71,7% na predição do E_m em função da V_0 .

5.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

5.2.1. Densidade

A Tabela 10 apresenta os valores médios da densidade aparente observada para os painéis LVLs confeccionados com as lâminas das duas espécies de *Pinus*.

Tabela 10. Valores médios da densidade aparente em painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

Espécie	Densidade (g/cm ³)
<i>Pinus oocarpa</i>	0,717
<i>Pinus kesiya</i>	0,712

Fonte: SOUZA et al. 2008b.

Notou-se que os painéis LVLs confeccionados com lâminas da espécie PO e de PK apresentaram densidade praticamente idêntica. A análise de variância corrobora esta informação, ou seja, não houve diferença significativa ao nível de 5% de significância para esta propriedade (Tabela 34, Apêndices).

Segundo LAMPRECHT (1990), a madeira sólida das duas espécies de *Pinus* pertence à mesma faixa de massa específica entre 0,45 e 0,70 g/cm³ e a densidade do produto final (painel) está intimamente ligada à massa específica da madeira de origem (KAMALA et al., 1999; PIO, 2002). Aliado aos mesmos parâmetros de confecção dos painéis (mesmo adesivo e gramatura, mesma pressão, tempo e temperatura de prensagem), este fato pode ter contribuído para a proximidade das densidades dos painéis de PO e PK.

5.2.2. Absorção de água e inchamento em espessura

A Figura 38 apresenta os valores da absorção de água (ABS) nos períodos de 2, 24 e 96 horas de imersão. Foi observado que de uma forma geral, os painéis LVLs da espécie PK tendem a absorver mais água comparativamente aos de PO, nos três períodos avaliados.

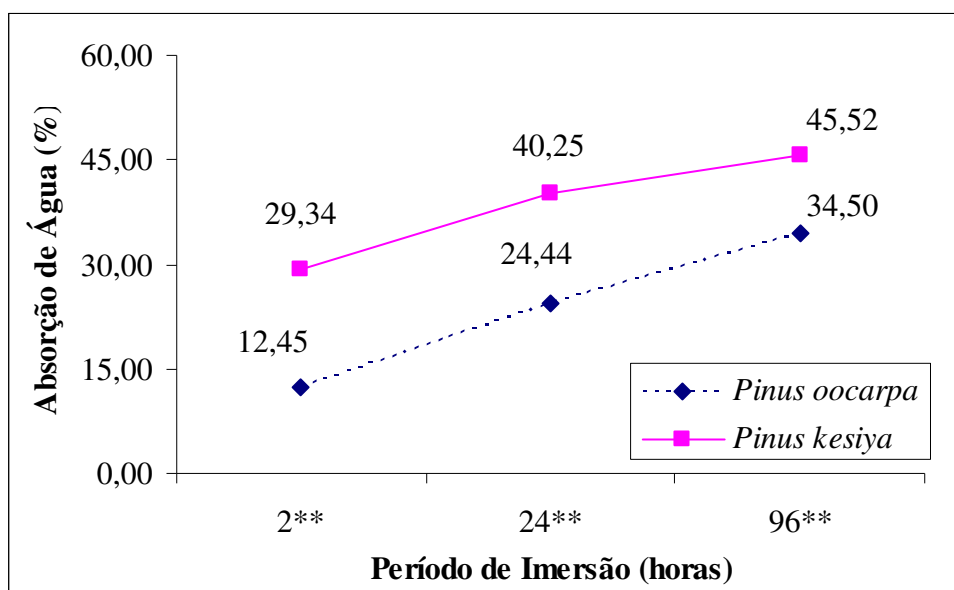


Figura 38. Valores médios da absorção de água (ABS) em painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya* após os períodos de 2, 24 e 96 horas de imersão em água, onde (**) – significativo ao nível de 1% de significância.

De acordo com as análises de variância realizadas (Tabelas 35 a 37, Apêndice), os valores de ABS são estatisticamente significativos ao nível de 1% nos períodos de 2, 24 e 96 horas para os LVL.

Possivelmente, o arranjo anatômico na madeira de *Pinus kesiya* proporcionou maior absorção de água, visto que as densidades aparentes estão, em valores absolutos, muito próximos. Segundo PIO (2002) estudando painéis LVLs confeccionados com lâminas da espécie *Eucalyptus grandis* obtidos de árvores com 15 e 20 anos, o autor observou valores de absorção de água entre 14,33 e 20,44% para a idade de 15 anos e valores entre 9,98% e 13,89% para a idade de 20 anos.

Portanto, os valores de absorção de água (%) observados em painéis LVLs confeccionados com lâminas de PO e PK estão condizentes com a literatura.

Com relação ao inchamento em espessura (IE), a Figura 39 apresenta os valores médios desta propriedade nos períodos de 2, 24 e 96 horas de imersão em água. Foi observado que de uma forma geral, os painéis de PK tendem a ter um IE superior ao observado para os painéis de PO, nos períodos de 2 e 24 horas.

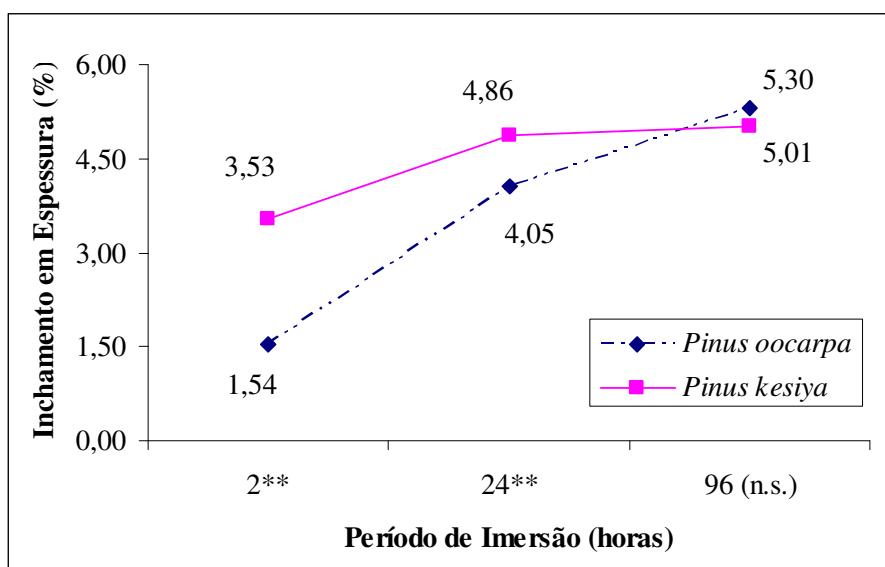


Figura 39. Valores médios do inchaço em espessura (IE) em painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya* após os períodos de 2, 24 e 96 horas de imersão em água, onde (***) – significativo ao nível de 1% e (n.s.) – não significativo ao nível de 5% de significância.

A análise de variância (Tabelas 38 a 40, Apêndice) indicou que o IE é estatisticamente significativo para os períodos de 2 e 24 horas ao nível de 1% entre os painéis de PO e PK, mas não para o período de 96 horas.

Assim, nas primeiras duas horas de imersão, os painéis LVLs de PK já apresentaram altos valores de inchaço em espessura (3,53%) quando comparados

aos de PO, onde foi observado o IE de aproximadamente metade do apresentado naquela espécie (1,54%).

Após as 24 horas de imersão, manteve-se o comportamento observado para o período de 2 horas, ou seja, os valores de inchamento em espessura para os painéis LVLs de PK foram sutilmente superiores aos de PO (4,86 e 4,05% respectivamente). Porém, no último período de avaliação do inchamento em espessura (96 horas), os painéis LVLs de *Pinus oocarpa* apresentaram um valor de inchamento em espessura superior ao do *Pinus kesiya* (5,01 e 5,3%).

Este comportamento observado para o inchamento em espessura está intimamente ligado a outra propriedade física, a absorção de água. Como visto anteriormente, a absorção de água nos painéis LVLs confeccionados com a espécie PK foi bastante superior aos de PO nos três períodos (2, 24 e 96 horas de imersão), resultando em um maior inchamento em espessura nos painéis LVLs de *Pinus kesiya*, principalmente nos períodos de 2 e 24 horas de imersão em água.

Conforme DEL MENEZZI (2006), o inchamento em espessura se deve a dois fatores: o inchamento higroscópico (adsorção de água nas paredes celulares) e o inchamento pela liberação das tensões de compressão. Assim, possivelmente as tensões de compressão impostas aos painéis da espécie PK foram liberadas de uma forma mais rápida que nos painéis de PO, o que resultou em um maior IE nos períodos de 2 e 24 horas de imersão.

PIO (2002) estudou painéis LVLs de *Eucalyptus grandis* com lâminas provenientes de árvores de 15 e 20 anos de idade e observou que para o período de 2 horas de imersão, o IE foi entre 4,42 e 11,33% para a idade de 15 anos e entre 6,59 e 14,70% para a idade de 20 anos. Já para o período de 24 horas de imersão, o IE observado foi entre 6,31 e 13,60% e entre 6,95 e 12,44%, respectivamente nas idades de 15 e 20 anos, ambos na terceira classe de resistência.

Tais valores observados em PIO (2002) são bastante superiores quando comparados aos valores observados nesta pesquisa, respeitando-se a influência da espécie (densidade e paredes celulares) e os processos de confecção. Entretanto, esta comparação ilustra a adequação da produção de painéis LVLs de PO e PK com relação às suas propriedades físicas favoráveis (baixo inchamento em espessura).

5.2.3. Taxa de não-retorno em espessura

A Tabela 11 apresenta os valores da taxa de não-retorno em espessura observados em painéis LVLs confeccionados com as duas espécies de *Pinus*. Observou-se que a taxa de não-retorno foi mais intensa nos painéis LVLs confeccionados com a espécie PK (3,08%) que nos painéis de PO (1,96%), apesar de tais valores serem razoavelmente baixos.

Tabela 11. Valores médios para a taxa de não-retorno em espessura observados nos painéis LVLs confeccionados com lâminas das espécies *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

Espécie	Taxa de Não-Retorno (TNRE) %**	Desv. Pad.
<i>Pinus oocarpa</i>	1,96	0,19
<i>Pinus kesiya</i>	3,08	0,48

Onde: (**) diferença estatisticamente significativa ao nível de 1% de significância.

De acordo com a Tabela 41 (Apêndice), verificou-se que a análise de variância indicou o efeito da espécie na taxa de não-retorno (TRNE) significativo ao nível de 1% de significância.

Os resultados do ensaio de inchamento em espessura (IE) corroboraram os resultados obtidos para o ensaio de TRNE. Desta forma, onde se observou maior IE nos painéis de PK nas primeiras 24 horas de imersão em água, maior valor de TRNE também foi observado nos painéis desta espécie, possivelmente pela rápida liberação das tensões de compressão impostas no painel de PK

5.2.4. Gradiente vertical de densidade

A princípio, observou-se que a densidade aparente média foi de 0,717 g/cm³ para os painéis LVLs confeccionados com PO e de 0,712 g/cm³ para os LVL de PK.

Com o auxílio da Figura 40 percebe-se claramente que para ambas as espécies, a densidade é maior próxima as faces do painel (Trechos 1 e 4), até aproximadamente a 3º medição, quando tende a cair até a 15º medição, onde se tem o início da porção do

miolo no painel. Este trecho representa aproximadamente 25% da espessura do corpo-de-prova ou cerca de 7 lâminas.

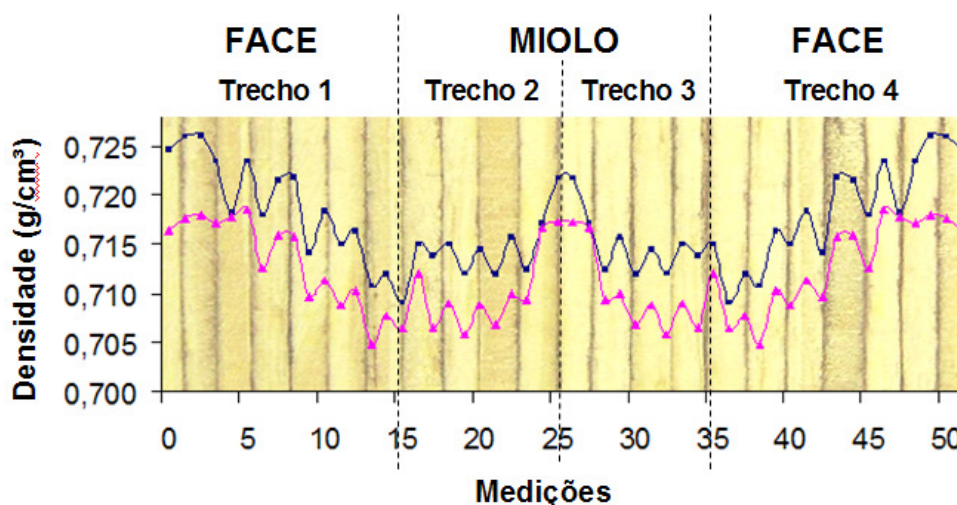


Figura 40. Densidade aparente para cada medição determinando o gradiente vertical de densidade em painéis LVLs de *Pinus oocarpa* (linha superior) e *P. kesiya* (linha inferior).

A partir da 15ª medição, observou-se um novo aumento na densidade até a metade do corpo-de-prova (da 15ª até a 25ª medição), onde em valores não superou a densidade observada nas faces do painel.

Portanto, o gráfico do gradiente vertical de densidade se aproximou ao formato da letra “w”, diferentemente dos painéis de madeira reconstituída, OSB e aglomerados, que apresentam o gradiente vertical de densidade em formato de “v” (GARCIA et al. 2005; PAINTER et al., 2006; CHEN et al., 2008).

De acordo com o modelo polinomial de regressão, onde a variável dependente (y) foi a densidade e a variável independente foi a medição (x), verificou-se que existe uma forte tendência deste comportamento para os 4 trechos, independentemente da espécie, conforme mostra a Tabela 12. Assim, foram observados altos valores de coeficiente de determinação nestes trechos.

Tabela 12. Análise de regressão polinomial de segundo grau, para os quatro trechos do gradiente vertical de densidade observado para os painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

Espécie	Trecho	R ²	Equação
<i>Pinus oocarpa</i>	1	0,8331	-3E-05x ² - 0,0005x +0,7259
	2	0,6704	0,0002x ² - 0,0023x +0,7178

<i>Pinus kesiya</i>	1	0,8407	$-5E-05x^2 - 7E-05x + 0,7181$
	2	0,8282	$0,0004x^2 - 0,0032x + 0,7138$

Apesar de ser de pequena magnitude, ou seja, a variação da densidade nas faces do painel ser apenas de 10^{-2} g/cm³, há indícios de que o gradiente vertical de densidade formado em painéis LVLs influencie outras propriedades, como é o caso da avaliação não destrutiva.

SOUZA et al. (2008a) verificaram que o aumento na densidade nas faces de painéis LVLs promovem o aumento na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) nas avaliações não destrutivas, fazendo com que fossem observados valores de 4859 m/s para a posição de ensaio *flatwise* e de 4774 m/s para a posição *edgewise*, em painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*. Os resultados indicam que este fato esteja ligado ao processo de confecção dos painéis.

CARVALHO et al. (2004) verificaram que os painéis LVLs produzidos com madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, apresentam maior módulo de elasticidade (MOE) na posição *flatwise* (13792 N/mm²) que na posição *edgewise* (12917 N/mm²). Segundo os autores, esta variação é devido ao processo de confecção dos LVL, conforme foi comentado anteriormente.

5.3. PROPRIEDADES BIOLÓGICAS

As médias das perdas de massa (PM) determinadas pelo ensaio acelerado de biodeterioração para as espécies de referência *Pinus* spp e *Cecropia* spp. causadas pelos fungos de podridão branca e parda estão listadas na Tabela 13.

Tabela 13. Médias das perdas de massa (%) e respectivas classes de resistências para as madeiras de referência *Pinus* spp e *Cecropia* spp.

Espécie	Fungo	Perda de Massa (%)	Desvio Padrão	Classe de Resistência
<i>Pinus</i> spp	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	48,72	4,42	NR
<i>Cecropia</i> spp.	<i>Trametes versicolor</i>	32,02	6,38	MR

Onde: NR: pouco ou não-resistente e MR: moderadamente resistente.

De acordo com a norma ASTM D 2017-05 (ASTM, 2005) é necessária uma avaliação preliminar com espécies de referência, neste caso as espécies *Pinus* spp. para o fungo de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*) e *Cecropia* spp. para o fungo de podridão branca (*Trametes versicolor*) no intuito de se comprovar a eficácia do ensaio de biodeterioração pela viabilidade do material biológico (fungos), visto que estas espécies são altamente suscetíveis à biodeterioração por estes microorganismos xilófagos (NZOKOU, 2005).

Os resultados da Tabela 13 mostraram que as espécies de referência foram intensamente deterioradas após o período de 12 semanas, o que pode ser visualizado na Fig. 41. Assim, foi observado um valor médio de 48,72% de perda de massa nos CPs da espécie *Pinus* spp. para o fungo *Gloeophyllum trabeum* e média de 32,02% para os CPs da espécie *Cecropia* spp. para o fungo *Trametes versicolor*. Este fato comprova a viabilidade do material biológico (atividade dos fungos), validando o experimento com os painéis LVLs.

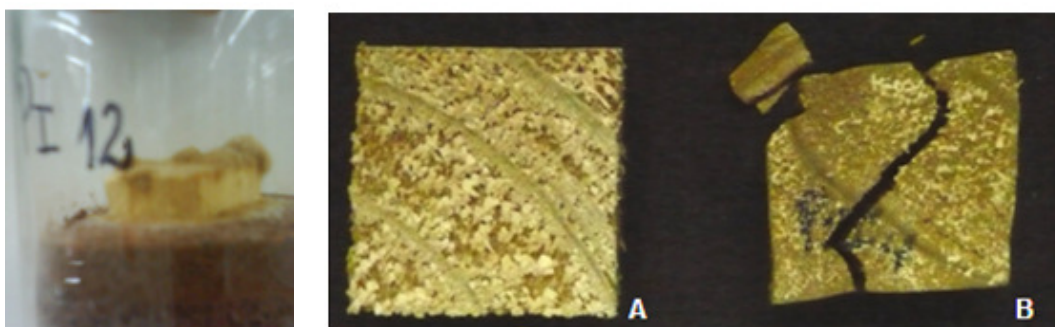


Figura 41. Corpo-de-prova (CP) da espécie de referência *Pinus* spp. após o ensaio acelerado de biodeterioração, conforme ASTM D 2017-05 (ASTM, 2005). Onde A: CP de madeira sadia; e B: CP de madeira atacada por podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*).

Desta forma, a Figura 42 apresenta os valores médios para a biodeterioração dos painéis LVLs de PO e PK após o ataque dos fungos de podridão branca e parda.

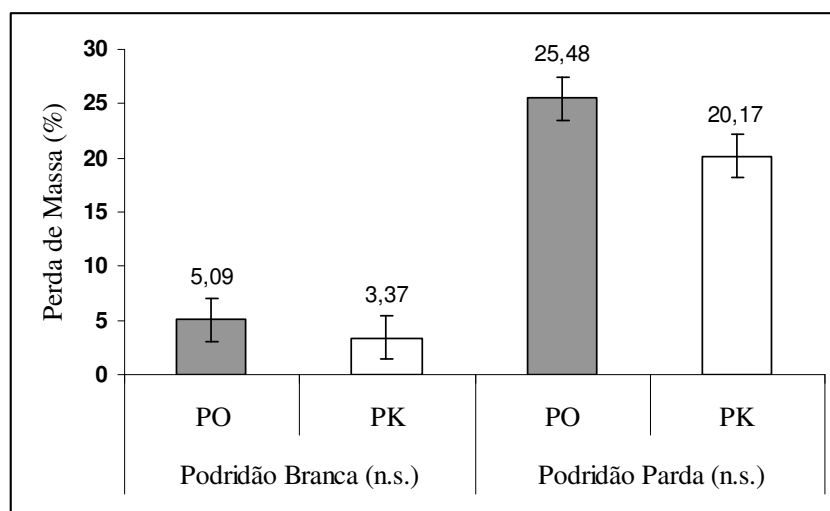


Figura 42. Valores médios da perda de massa (%) observados para os painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya* após a biodeterioração causada pelos fungos de podridão branca (*Trametes versicolor*) e podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*), onde PB – podridão branca, PP – podridão parda e (n.s.) – não significativo ao nível de 5% de significância.

Assim, foi observado um valor médio de perda de massa de 5,09% nos CPs de LVLs confeccionados com a espécie *Pinus oocarpa* quando atacado pelo fungo *Trametes versicolor* e um valor médio de 25,48% para o fungo *Gloeophyllum trabeum*. Tais valores observados para a biodeterioração dos painéis LVLs de *Pinus oocarpa* foram superiores quando comparados à perda de massa dos LVL confeccionados com a espécie *Pinus kesiya* para ambos os tipos de fungos, onde se observaram os valores de 3,37 e 20,17% para os fungos *Trametes versicolor* e *Gloeophyllum trabeum*, respectivamente.

Entretanto o efeito da espécie de madeira na confecção de painéis LVLs não foi estatisticamente significativo na perda de massa para ambos os fungos, como se percebe pelas Tabelas 42 e 43 (Apêndices).

Observou-se que a biodeterioração causada pelo fungo de podridão branca se restringiu à perda de massa, não visível a olho nu e às pequenas alterações no padrão de cor das lâminas de PO e PK (Fig. 43). Por outro lado, foi observado que a biodeterioração causada pelo fungo de podridão parda foi mais intensa que o fungo de podridão branca, corroborando o citado por MARTÍNEZ et al. (2005), onde o fungo de

podridão parda se desenvolve melhor em madeira de coníferas e a podridão branca em folhosas.

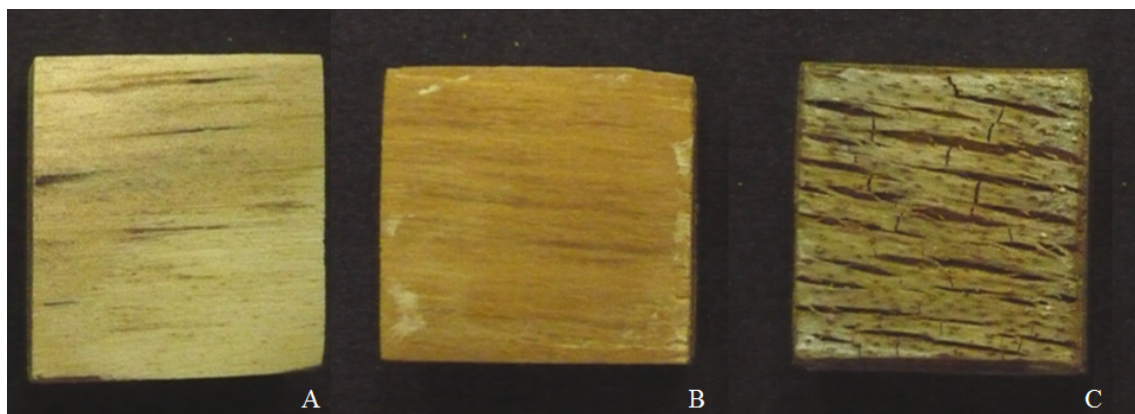


Figura 43. Defeitos causados pelo ensaio de biodeterioração observados na porção inferior dos corpos-de-prova de LVL das duas espécies (*Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*). Onde: A: corpo-de-prova de LVL com madeira sadia; B: LVL após ataque da podridão branca; e C: LVL após ataque da podridão parda.

Desta forma, a biodeterioração causada pelo fungo de podridão parda tornou os CP de LVL de ambas as espécies de *Pinus* em um material quebradiço, causando muitas vezes fissuras, trincas e perda de material, geralmente na porção inferior dos corpos-de-prova. De acordo com o citado por OLIVEIRA et al. (1986), estas rachaduras e trincas são comumente observadas nos materiais expostos à podridão parda.

Ainda, segundo PHINNEY (1950) citado por KOLLMANN et al. (1975) as delaminações que não eram esperadas na utilização de adesivo fenol formaldeído, ocorreram na porção inferior de certos corpo-de-prova de LVL, independentemente da espécie – *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*, conforme observa-se na Fig. 44.

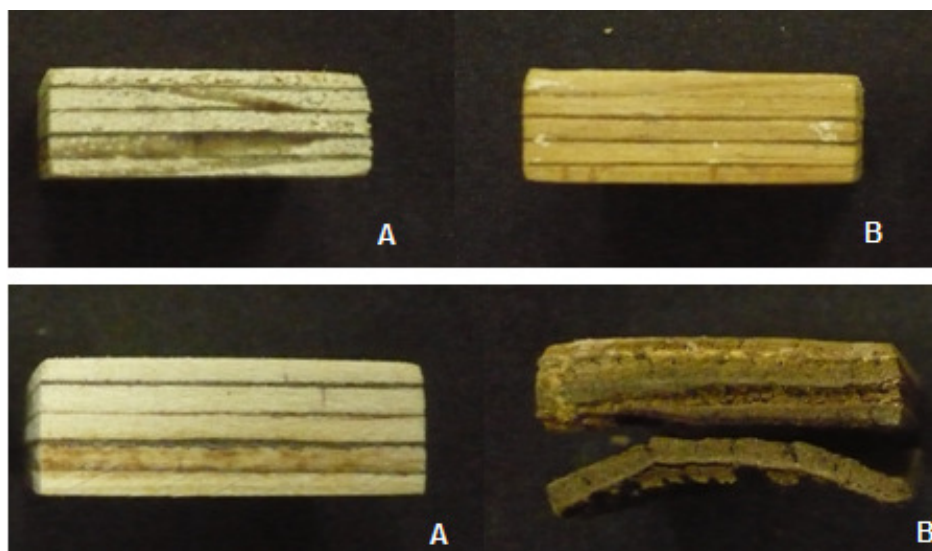


Figura 44. Exemplo do aspecto visual pós biodeterioração causada pelo fungo de podridão branca *Trametes versicolor* (parte superior) e podridão parda *Gloeophyllum trabeum* (parte inferior) independentemente das espécies *Pinus* nos painéis LVLs (*Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*). Onde: A: corpo-de-prova de LVL sadio; e B: LVL pós biodeterioração.

Com relação às classes de resistência citada pela norma ASTM D 2017-05 (ASTM, 2005), a biodeterioração causada pelo fungo de podridão parda, *Gloeophyllum trabeum*, determinou a classe de resistência “moderadamente resistente” para os painéis LVLs de PO; e classe “resistente” para os LVLs de PK. Apesar de ter sido classificada como “moderadamente resistente”, a perda de massa observada para os LVLs de PO (25,48%) para o fungo *Gloeophyllum trabeum* foi muito próxima à última referência da classe “resistente” (24%) (ASTM, 2005), mostrando também a baixa suscetibilidade frente à podridão parda.

Para ambos os tipos de podridão, apesar de a grande maioria das madeiras de *Pinus* ser suscetível a estes tipos de microorganismos (NZOKOU, 2005), visto que tal classe de fungos basidiomicetos se desenvolve mais rapidamente em madeira de coníferas (MARTÍNEZ et al. 2005), observou-se que os processos de confecção dos painéis LVLs influenciaram para o pouco desenvolvimento dos fungos.

Segundo MOSLEMI (1974) e SKEIST (1990) citados por SANTOS et al. (2003), espera-se que, com a utilização de resina fenol-formaldeído em painéis de madeira, seja baixa a atividade de organismos xilófagos, entre eles os fungos apodrecedores. Possivelmente, pela emissão de vapor de formaldeído, tóxicos para tais organismos (FOURGEROUSSE, 1985 citado por NZOKOU et al. 2005). De acordo

com a *EMISSION FACTOR INDUSTRY* (2002) e ROFFAEL (2006), as resinas fenólicas confeccionadas atualmente emitem pouca quantidade de vapores de formaldeído, mas provavelmente, em quantidade significativas para limitar inicialmente o crescimento das hifas dos fungos.

Percebe-se que, pela Fig. 45, na podridão parda onde é mais facilmente observada a biodeterioração, o crescimento das hifas e a biodeterioração ocorreram em regiões afastadas das linhas de cola, pela limitação do crescimento das hifas, consequência do efeito tóxico da resina fenol-formaldeído utilizada na união das lâminas de madeira. Ainda, a biodeterioração ocorreu em maior intensidade na porção inferior dos corpos-de-prova, devido ao maior contato com a placa suporte (fonte de inóculo) e a limitação do tempo em 12 semanas de acordo com a norma ASTM D 2017-05 (ASTM, 2005).



Figura 45. Vista lateral de um corpo-de-prova de LVL (CP) após o ataque do fungo *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda) exemplificando a limitação do crescimento, basicamente na porção inferior do CP e em regiões afastadas da linha de cola.

O calor utilizado para a cura do adesivo provavelmente também teve papel importante na limitação do crescimento das hifas dos fungos. Segundo SERENK et al. (2004) citado por FOLLRICH et al. (2006) a madeira quando exposta a altas temperaturas têm sua superfície inativada e nas camadas próximas a esta superfície, mudanças químicas e físicas ocorrem com os compostos da madeira, diminuindo também a higroscopicidade, que é um fator indispensável para o desenvolvimento do fungo. Ainda, os adesivos têm como papel, isolar os sítios de adsorção de água (grupos “- OH”), servindo como hidrorrepelentes, como é o caso da resina fenol-formaldeído (HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Segundo OLIVEIRA et al. (1986) para os fungos deteriorarem e se alimentarem da madeira é necessário um reconhecimento dos polímeros naturais na composição da parede celular por meio de processos enzimáticos específicos. Assim, possivelmente o desenvolvimento do fungo foi prejudicado pela alteração de alguns polímeros no corpo-de-prova de LVL de ambas as espécies, devido ao processo de confecção à 150°C. Juntamente ao calor, as altas pressões exercidas na concepção dos painéis LVLs compactam as camadas externas (CARVALHO et al. 2004), o que dificulta a penetração das hifas dos fungos.

DEL MENEZZI et al. (2008b) estudaram o efeito do tratamento térmico em painéis OSB de *Pinus* frente a biodeterioração de fungos de podridão branca (*Trametes versicolor*) e de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*). Foram testadas duas temperaturas (190 e 220°C) e para cada temperatura, três tempos de prensagem (12, 16 e 20 minutos), resultando em seis tratamentos. Assim, os autores observaram que os painéis OSB tratados termicamente apresentaram menor umidade de equilíbrio, o que dificultou o crescimento das hifas dos fungos em um primeiro instante. Também foi observado que o conteúdo de hemicelulose foi reduzido de 17,1% para 13,1%, com relação à amostra controle, a galactose foi completamente eliminada e a arabinose foi reduzida de 1,3% para 0,38%, ambos para o tratamento a 220°C e 20 minutos.

Comparativamente, as poucas referências encontradas na literatura mostram que a perda de massa observada para os painéis LVLs confeccionados com PO e PK estão em valores apropriados. Segundo NZOKOU et al. (2005), para LVL confeccionados com a espécie *black locust* (*Robinia pseudoacacia*), *sassafras* (*Sassafras albidum*) e *red maple* (*Acer rubrum*) foram observadas perdas de massa para o fungo de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*) correspondentes à 7, 6 e 24% respectivamente. No caso da podridão branca com o fungo *Trametes versicolor*, observaram-se: 7, 12 e 53% de perda de massa para tais espécies, respectivamente.

5.4. SUMÁRIO DOS RESULTADOS

De uma forma geral, os painéis LVLs confeccionados com lâminas da espécie PK apresentaram propriedades mecânicas superiores aos painéis LVLs de PO. Entretanto, os painéis de PO apresentaram melhores resultados nas propriedades físicas.

Com relação às propriedades biológicas, os resultados foram semelhantes para os painéis LVLs das duas espécies de *Pinus*, sendo que a perda de massa foi levemente superior nos painéis de PK.

Já para a avaliação não destrutiva, os painéis de PK apresentaram valores superiores para todas as propriedades consideradas.

A Tabela 14 resume todos os resultados das propriedades mecânicas, físicas e biológicas, assim como da avaliação não-destrutiva, apresentados no presente estudo.

Tabela 14. Comparação entre os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya* para todas as propriedades mecânicas, físicas e biológicas avaliadas.

Característica	Propriedade	Espécie		Significância
		<i>Pinus kesiya</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	
Propriedades Mecânicas	E_m flatwise	+	-	**
	f_m flatwise	+	-	**
	E_m edgewise	-	+	**
	f_m edgewise	=	=	n.s.
	$f_{c,0}$	+	-	**
	$f_{gv,0}$	+	-	n.s.
	$f_{gv,90}$	=	=	n.s.
Avaliação Não Destrutiva	E_{md} flatwise	+	-	**
	V_o flatwise	+	-	**
	E_{md} edgewise	+	-	**
	V_o edgewise	+	-	**
Propriedades Físicas	<i>Dens.</i>	=	=	n.s.
	<i>ABS-2</i>	-	+	**
	<i>ABS-24</i>	-	+	**
	<i>ABS-96</i>	-	+	**
	<i>IE-2</i>	-	+	**
	<i>IE-24</i>	-	+	**
	<i>IE-96</i>	=	=	n.s.
Propriedades Biológicas	<i>TNRE</i>	-	+	**
	<i>PMPB</i>	=	=	n.s.
	<i>PMPP</i>	=	=	n.s.

Onde: PMPB – perda de massa em podridão branca, PMPP – perda de massa em podridão parda, (+) – valor favorável, (-) – valor desfavorável, (=) – valores estatisticamente iguais, (**) – significativo ao nível de 1% de significância e (n.s.) – não significativo ao nível de 5% de significância.

De acordo com a avaliação não-destrutiva (AND) realizada, foi observado que a V_o foi superior para os painéis da espécie PK. Vários estudos demonstraram que aumentando a continuidade do material, ou seja, com menor quantidade de espaços vazios, menor será o tempo de propagação da onda de tensão no painel, fazendo com

que aumente a V_0 (DEL MENEZZI et al., 2007; HAN et al., 2006; BRASHAW et al., 2004).

Portanto, deste comportamento inferiu-se que o arranjo anatômico da madeira de PK proporcionou maior continuidade dos tecidos dentro das lâminas ou menor quantidade de espaços vazios, o que determinou maior V_0 nestes painéis. Segundo GUNGOR et al. (2006) na espécie de madeira de folhosa *Pterocarya fraxinifolia*, a porcentagem de fibras, o comprimento da fibra, o diâmetro tangencial e radial dos vasos proporcionaram o grau de porosidade na madeira desta espécie, ou seja, a quantidade de espaços vazios. Segundo os autores, estas características anatômicas influenciaram na confecção dos painéis LVLs e por fim na densidade do produto final.

Ainda, a menor presença de espaços vazios na lâmina da espécie PK explicou os resultados superiores do E_m e f_m nos painéis desta espécie, conforme foi apresentado, visto que a densidade dos painéis das duas espécies foi praticamente a mesma.

Com relação às propriedades físicas, a menor quantidade de espaços vazios nas lâminas de PK, explicou a maior absorção de água. Sabe-se que quanto maior a quantidade de parede celular em um mesmo volume, maior a adsorção de água nestas paredes e conseqüentemente, maior a absorção de água pelo material (HAYGREEN e BOWYER, 1996; KOLLMAN et al. 1975). Assim, inferiu-se que a menor quantidade de espaços vazios, ou seja, maior quantidade de parede celular foi determinante para uma maior absorção de água por parte dos painéis de PK.

Também se sabe que a partir de uma alta absorção de água, é esperado um alto inchamento em espessura. Este comportamento foi observado com relação aos painéis de PK, onde os maiores valores de absorção de água refletiram em um maior inchamento em espessura. Ainda, foi observado que os painéis de PK tiveram um inchamento em espessura mais rápido que os de PO, possivelmente pela liberação mais rápida das tensões de compressão impostas ao painel de PK.

Assim, inferiu-se que a partir deste rápido inchamento em espessura, houvesse uma maior tensão de compressão nos painéis de PK, o que explicaria também a maior taxa de não-retorno em espessura nos painéis desta espécie.

Por outro lado, a menor presença de espaços vazios, ou seja, a maior conectividade entre as células nas lâminas de madeira de PK facilitaria o caminho a ser percorrido pelas hifas dos fungos durante o ensaio de biodeterioração. CHUNG et al.

(1999) observaram este comportamento na biodeterioração de painéis compensados e OSB, onde a propagação das hifas foi facilitada pela continuidade do material (lâminas de madeira) nos painéis compensados, determinando maior intensidade de deterioração em um primeiro momento.

6. CONCLUSÕES

De uma forma geral, os painéis LVLs de PO e PK apresentaram boa qualidade, onde não se observou a formação de bolhas ou delaminações.

Os painéis LVLs confeccionados com a espécie PK apresentaram propriedades mecânicas superiores, quando comparados aos painéis de PO.

Os painéis de PO apresentaram propriedades físicas mais adequadas que os de PK, onde foi observado: menor absorção de água, menor inchamento em espessura e menor taxa de não-retorno em espessura.

As propriedades biológicas foram semelhantes para os painéis de PO e PK, sendo que foi observada perda de massa ligeiramente superior para os painéis de PO para ambos os fungos de podridão branca e parda.

A utilização da V_0 e do E_{md} na avaliação não-destrutiva não foi eficiente para prever as propriedades mecânicas de painéis LVLs confeccionados com as espécies PO e PK, onde os melhores resultados foram observados na predição do E_m pelo E_{md} nos LVL de PK.

O Gradiente vertical de densidade (GVD) foi observado nos LVLs de PO e PK, sendo levemente mais intenso nos LVLs de PO. Apesar de ser bastante sutil, verificou-se que o GVD influencia nas propriedades mecânicas e na avaliação não-destrutiva, tornando os valores de E_m , E_{md} e V_0 superiores para a posição *flatwise*.

Desta forma, os painéis LVLs confeccionados com PO e PK se mostraram eficientes do ponto de vista mecânico, físico e biológico. Entretanto, para as determinadas utilizações (uso exterior ou interior), devem-se ponderar suas características, pois os painéis LVLs confeccionados com a espécie *Pinus kesiya* são mais resistentes do ponto de vista mecânico e biológico que os confeccionados com *Pinus oocarpa*. Estes últimos apresentaram maior estabilidade dimensional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAIR, C. **Engineered lumber makers step it up**. 2006. Obtido pelo site <<http://www.djc.com/news/co/11176949.html>>. Acesso em 22/03/2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Mechanical properties of lumber and wood-base structural material. ASTM D 4761. Annual book of ASTM standards, v 04.10. ASTM, West Conshohocken, PA. 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM D 198. **Annual book of ASTM standards**, v. 03.01. ASTM, West Conshohocken, PA. 1999a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods of evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. ASTM D 1037 **Annual book of ASTM standards**, v. 15.03. ASTM, West Conshohocken, PA. 1999b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. ASTM D 2017. **Annual book of ASTM standards**. ASTM, West Conshohocken, PA. 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard specification for evaluation of structural composite lumber products. ASTM D 5456. **Annual book of ASTM standards**. ASTM, West Conshohocken, PA. 2006.

AYDIN, I.; COLAK, S.; ÇOLAKOĞLU, G.; SALIH, E. A comparative study on some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) produced from Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. veneers. **Holz Roh Werkst**, 62: 218-220. March – 2004.

BALDWIN, R. F. Plywood manufacturing practices. San Francisco: Miller Freeman, 1981. 326p.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Árvore**, vol.27 no.3 Viçosa May/June 2003.

BENITES, L. Características de madera de chapas laminadas (LVL) de plantaciones de rápido crecimiento Del Uruguay – *Eucalyptus grandis*, *Populus spp.*, *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*. **Notas Técnicas LATU Sector Productos Forestales**, n. 3. Disponível em: <<file:///H:/nota3.html>>. Acesso em 15 set. 2007.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York, 736p. 1993.

BOHLEN, J. D. Laminated veneer lumber, Development and economics. **Forest Products Journal** v. 22, n. 1, p. 18-26. 1972.

BOOTLE, K. R. **Wood in Australia: Types, properties and uses**. McGraw-Hill Book Company. Sidney-Australia; 443 p. 1983.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Avaliação da qualidade da Madeira de *Pinus merkusii* para produção de lâminas. *Scientia Forestalis*, v. 36, n. 78, p.95-103, jun. 2008.

BOWER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest Products and wood science: An Introduction**. Blackwell Publishing, 4^o ed. Iowa, US. 554 p. 2003.

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

CARVALHO, A. M. de; LAHR, F. A. R. Painéis laminados estruturais, LVL's. **Remade-Revista da Madeira**. Maio, 2003.

CARVALHO, A.M.; LAHR, F.A.R.; BORTOLETTO JÚNIOR., G. Use of Brazilian eucalyptus to produce LVL panels. *Forest Products Journal*, v. 54, n. 11, p. 61-64. 2004a.

CURLING, S. F.; CLAUSEN, C. A.; WINANDY, J. E. Relationships between mechanical properties, weight loss, and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay. *Forest Products Journal*, v. 52, n. 7/8, p. 34-39. Julho/Agosto, 2002.

CURLING, S. F.; MURPHY, R. J. The use of the decay susceptibility index (DSI) in the evaluation of biological durability tests of wood based board materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, n. 60, p. 224-226. 2002.

DEL MENEZZI, C. H. S. Instabilidade dimensional da madeira e de seus subprodutos: causas, conseqüências e prevenções. *Comunicações Técnicas Florestais*, v. 8, n. 2. Brasília, 2006.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; SOUZA, M. R. Avaliação não-destrutiva de painéis OSB modificados termicamente: parte 1 – efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão. *Scientia Forestalis*, n. 76, p. 67-75, 2007.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R.; SANTOS, A. P.; SOUZA, M. R.; CAMARGOS, J. A. A. Evaluation of stress wave and colorimetric variables to predict flexural properties of Brazilian tropical woods. In: **10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Proceedings**. 7p.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, R. Q.; THOMPSON, R. M.; TEIXEIRA, D. E.; OKINO, E. Y. A.; COSTA, A. F. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 62, p. 448-454, 2008b.

ECKELMAN, C. A. Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. *Forest Products Journal*. Madison: v. 43, n. 4, p. 19-25. Apr – 1993.

EMISSION FACTOR DOCUMENTATION FOR AP-42. Chapter 10, Wood Products Industry, prepared for the U. S. Environmental Protection Agency, OAQPS/EFIG, by Midwest Research Institute, Cary, NC, May 2002.

ERIKSON, R. G.; GORMAN, T. M.; GREEN, D. W.; GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. *Forest Products Journal*, v. 50, n. 7/8, p. 59-65. 2000.

FERNANDES, L.; LOGUERCIO-LEITE, C.; ESPOSITO, E.; REIS, M. M. In vitro wood decay of *Eucalyptus grandis* by the basidiomycete fungus *Phellinus flavomarginatus*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, n. 55, p. 187-193. Novembro, 2005.

FERRAZ, A., ESPOSITO, E., BRUNS, R.E., DURAN, N. The use of principal component analysis (PCA) for pattern recognition in *Eucalyptus grandis* wood biodegradation experiments. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* n. 14, p. 487-490. 1998.

FOLLRICH, J.; MULLER, U.; GINDL, W. Effects of thermal modification on the adhesion between spruce wood (*Picea abies* Karst.) and a thermoplastic polymer. *Holz als Roh- und Werkstoff*, n.64, p.373-376, 2006.

GABRIEL, M. S. C. Desempenho físico-mecânico de painéis LVLs de *Pinus Tropicais* da região de São Paulo. Botucatu 2007, 125f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.

GABRIEL, M. S. C.; BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Desempenho à flexão no eixo de maior inércia de vigas LVL de *Pinus tropicais* – efeito da classificação e arranjo das lâminas. “In: XI Encontro brasileiro em madeira e estruturas de madeiras, Londrina, 2008.

GHUNG, W. Y.; WI, S. G., BAE, H. J.; PARK, B. D. Microscopic observation of wood-based composites exposed to fungal deterioration. *Journal of Wood Science*, n. 45, p. 64-68. Julho, 1999

GUNGOR, N. M.; AYRILMIS, N.; KANTAY, R. Selected physical and mechanical properties of LVL made from *Pterocarya fraxinifolia* (Clam) Spach. *Forest Products Journal*, v. 56, n. 5, p. 82-85. May – 2006.

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

HARDING, O. V.; WYK, J. L. V.; ORANGE, R. P. Influence of three processing strategies on stiffness and dimensional stability of radiate pine structural lumber. *Forest Products Journal*, v. 48, n. 5, p. 57-62, 1998.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. *Forest Products and Wood Science: an introduction*. Iowa State University Press, 2^o ed. Iowa, US. 500p. 1996.

IWAKIRI, S. e KEINERT JÚNIOR, S. Utilização de diferentes espécies do gênero *Pinus* para produção de painéis “waferboards”. *IPEF*, n. 43/44, p. 65-69, 1990.

IWAKIRI, S. Painéis de Madeira reconstituída. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná – FUPEF. Curitiba-PR, 247p. 2005.

JANOWIAK, J. J.; BUKOWSKI, S. W. Toughness properties for several composite lumber materials. *Forest Products Journal*, v. 50, n. 5, p. 51. May, 2000.

JONES, H. L.; WORRALL, J. J. Fungal biomass in decayed wood. *Micologia*, n. 87(4), p. 459-466. 1995.

KAMALA, B. S.; KUMAN, P.; RAO, R. V.; SHARMAN, S. N. Performance test of laminated veneer lumber (LVL) from rubber wood for different physical and mechanical properties. *Holz als Roh und Werkstoff*, v. 57, p. 144-116, Springer-Verlag. 1999.

KARTAL, S. N.; GREEN, F. Decay and termite resistance of medium density fiberboard (MDF) made from different wood species. *International Biodeterioration and Biodegradation*, n. 51, p. 29-35, mar. 2003.

KELLY, M. R. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. USDA/FS: Madison, 1977. 10p. (General Technical Report FPL-10).

KILLIC, Y.; COLAK, M.; BAYSAL, E.; BURDURLU, E. An investigation of some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber manufactured from black alder (*Alnus glutinosa*) glued with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives. *Forest Products Journal*, v. 56, n. 9, p. 56-59. Sept – 2006.

KOEHLER, B. S. A. **The properties and uses of wood**. Industrial education series. Mc-Graw-Hill Book Company, INC. New York and London. 354 p. 1924.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, AL. J. **Principles of wood science and technology: Wood based materials**, vol. 2 Spring - Verlag Berlím. Heidelberg, New York-US; 703 p. 1975.

LAMPRECHT, HANS. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas – possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. GTZ, Eschborn (Trad. De Guilherme de Almeida-Sedas e Gilberto Calcagnatto). – Rossdorf: TZ – Verl. – Ges, 1990.

LEE, J. N.; TANG, R. C.; KAISERLIK, J. H. *Edgewise* static bending properties of Yellow-poplar laminated veneer lumber: Effect of veneer-joint designs. *Forest Products Journal*, v. 49, n. 7/8, p. 64-70. Jul/Aug – 1999.

LEE, J. N.; WU, Q. In-plane dimensional stability of three-layer oriented strandboard. *Wood and Fiber Science*, Madison, v. 34, n. 1, p. 77-95, 2002.

LEPAGE, E.S. Preservativos e sistemas preservativos. In: LEPAGE, E.S. (Coord.). **Manual de preservação de Madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v. 1. p. 279-342.

LOPEZ, G. A. C.; MILANO, S. Avaliação da durabilidade natural da madeira e de produtos usados na sua proteção. In: LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v.2, p.473-521.

MARTÍNEZ, A. T.; SPERANZA, M.; RUIZ-DUEÑAS, F.; FERREIRA, P.; CAMARERO, S.; GUILLÉN, F.; MARTÍNEZ, M. J.; GUTIÉRREZ, A.; RÍO, J. C. Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology*, n. 8, p.195-204, may, 2005.

MATOS, J. L. M. Estudo sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba 1997. 117p.

MEDINA, J. C. Efeito da temperatura de aquecimento nas lâminas por desenrolamento e sobre as qualidades da colagem de compensados fenólicos de *Pinus elliottii* Eng. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986.

MENDES, A. S.; ALVES, M. V. S. **A degradação da madeira e sua preservação**. Brasília, IBDF/DPq-LPF, 1986.

METRIGUARD INC. Metriguard Model 239^a Stress Wave Timer. Manual care and instructions, theory and data reduction. Pullman, 1997. Também Disponível em formato eletrônico: <www.metriguard.com>

MINA, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R. de; CALIL JÚNIOR., C.; DIAS, A. A.; SALES, A. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. *Scientia Florestalis*, n. 65, p. 188-196, jun, 2004.

MIROV, N. T. **The Genus Pinus**. The Ronald Press Company. New York-US. 602 p. 1967.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* Parte I – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. *Árvore*, v. 29, n. 3, p.461-470, 2005.

MUIN, M. e TSUNODA, K. Biological performance of Wood-based composites treated with a formulation of 3-iodo-2-propynyl butylcarbamate and silafluofen using supercritical carbon dioxide. *Journal of Wood Science*, n.50, p. 535-539, 2004.

NZOKOU, P.; ZYSKOWSKI, J.; BOURY, S.; KAMDEM, D. P. Natural decay resistance of LVL made of veneers from durable and non-durable wood species. *Holz als Roh- und Werkstoff*, n. 63, p. 173-178. Mar., 2005.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. S.; SOUSA, M. E. S.; TEIXEIRA, D. E. Evaluation of the physical and biological properties of particleboard and flakeboard made from *Cupressus* spp. *International biodeterioration and biodegradation*, n. 53, p. 1-5, 2004.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. S.; SOUSA, M. E.; TEIXEIRA, D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus spp.* Cement-bonded particleboards. *Cement and Concrete Composites*, n. 27, p. 333-338, mar., 2005.

OKINO, E. Y. A.; ALVES, M. V. S.; TEIXEIRA, D. E.; SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E. Biodegradação de chapas de partículas orientadas de *Pinus*, eucalipto e cipreste expostas a quatro fungos apodrecedores. *Scientia Florestalis*, n. 74, p. 67-74, junho 2007.

OLIVEIRA, A. M. F.; LELIS, A. T.; LEPAGE, E. S.; LOPEZ, A. C.; OLIVEIRA, C. S.; CANEDO, M. D.; MILANO, S. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E. S. (Coord.) **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v.1 p.99-279.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood. *Materials Research*, v. 5, n. 1, p. 51-55. 2002.

PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W.; ROCHA, C. D. “Propriedades de flexão de vigas LVL de *Eucalyptus grandis*. “In: XI Encontro brasileiro em madeira e estruturas de madeiras, Londrina, 2008a.

PALMA, H. A. L. BALLARIN, A. W.; ABILIO, R. M. Propriedades mecânicas de painéis LVLs de *Pinus* tropicais. “In: XI Encontro brasileiro em madeira e estruturas de madeiras, Londrina, 2008b.

PEDROSA, A. L. Performance de vigas “I” constituídas por flanges de PLP e almas de compensados de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden, e alma de OSB de *Pinus spp.* Curitiba 2003. 119 p. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

PIO, N. S. Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. Curitiba 2002, 168 f. **Tese** (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

POCIUS, A. V. **Adhesion and Adhesives technology: An Introduction**. Carl Hanser Verlag; Hanser Gardner Publications. Munich, Germany, 319 p. 2002.

RENZO, R. Painel estrutural de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* utilizando adesivos resorcinólico, tanino e poliuretano derivado de óleo de mamona. Lavras 2008, 98p. **Dissertação** (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras – UFLA.

RITTER, M.; LEE, P. H.; KAINZ, J.; MEYER, C. Evaluation of stress-laminated t-beam bridges constructed of laminated veneer lumber. National conference on wood transportation structures. Madison, WI. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**. Gen. Tech. Rep. FPL- GTR-94. October 23-25. 1996.

ROFFAEL, E. Volatile organic compounds and formaldehyde in nature, wood and wood based panels. *Holz als Roh- und Werkstoff*, n. 64, p. 144-149, 2006.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, v. 48, n. 1, p. 14-19. 1998.

SANTOS, C. B.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; BARBOSA, L. C. Efeito da variação do pH e da temperatura de síntese no desempenho de adesivos à base de creosoto vegetal desmetilado-formaldeído. *Árvore*, v. 27, n. 4. Viçosa Julho/Agosto. 2003.

SANTOS, A. M. L. Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado. Brasília 2008, 94p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília - UnB

SCHAFFER, E. L. et al. Press-Lam process: Fast, efficient conversion of logs into structural products. *Forest Products Journal*, v. 22, n. 11, p. 11-18. 1972.

SCHENECTADY CRIOS. Cr-7010 Resina Fenólica. **Boletim Técnico** Fev, 1999.

SELLERS, T. Plywood and adhesive technology. Marcel Dekker, INC. Forest Products Utilization Laboratory. Mississippi-US. 661 p. 1985.

SELLERS, T. Wood adhesive innovations and applications in North America. *Forest Products Journal*, v. 51, n. 6, p. 12-22. June – 2001.

SOUZA, F.; DEL MENEZZI, C. H. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; SANTOS, A. M. L. “**Influência da espécie e do eixo estrutural na velocidade de propagação de ondas de tensão em painéis de lâminas paralelas (LVL)**”. In: 5º Simpósio de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Brasília DF. Anais v.1, p409-419, 2008a.

SOUZA, F.; DEL MENEZZI, C. H. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; SANTOS, A. M. L.; TELES, R. F. “Gradiente vertical de densidade em painéis de lâminas paralelas confeccionados com *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*”. In: I Simpósio de Ciência e Tecnologia da Madeira do Estado do Rio de Janeiro - SIMADERJ, Rio de Janeiro RJ. Anais do I SIMADERJ, 2008b.

SILVA, C. A.; MONTEIRO, M. B. B.; BRAZOLIN, S.; LOPEZ, G. A. C.; RICHTER, A.; BRAGA, M. R. Biodeterioration of brazilwood *Caesalpinia echinata* Lam. (Leguminosae-Caesalpinioideae) by rot fungi and termites. *International Biodeterioration and Biodegradation*, n. 60, p. 285-292. July, 2007.

SIMPSON, W. T.; e WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. *Forest Products Journal*, v. 51, n. 10, p. 51-54, 2001.

SHUKLA, S. R.; KAMDEN, D. P. Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: effect of the pressure duration. *Holz als Roh- und Werkstoff*, n. 66, p. 119-127, 2008.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood. New York: Chapman & Hall, 1991. 494p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Wood Handbook: wood as engineering material. USDA: Washington, 1999. 473p.

UYSAL, B. Bonding strength and dimensional stability of laminated veneer lumbers manufactured by using different adhesives after the steam test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, n. 25, p. 395-403, 2005.

VALENZUELA, R. O.; FREER, J. BAEZA, J. RODRÍGUEZ, J. Evaluation of fungal endophytes for lignocellulolytic enzyme production and wood biodegradation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, n. 57, p. 129-135. January, 2006.

WANG, X.; ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; VERHEY, S. A.; FORSMAN, I. W.; ERICKSON, J. R. Flexural properties of laminated veneer lumber manufactured from ultrasonically rated red maple veneer: A pilot study. Res. Note FPL-RN-0288. Madison, W: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**. 5 p. June, 2003.

APÊNDICES

A. ANÁLISE ESTATÍSTICA

1. Propriedades Mecânicas

1.1. Ensaio de flexão estática

Tabela 15. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade (E_m) em ensaio de resistência à flexão estática, *posição flatwise*, nos painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5908146,063	1	5908146,063	17,904122	0,00022534	4,195971707
Dentro dos grupos	9239665,019	28	329988,0364			
Total	15147811,08	29				

Tabela 16. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de ruptura (f_m) em ensaio de resistência à flexão estática, *posição flatwise*, nos painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	680,6188632	1	680,6188632	10,13833105	0,003545038	4,195971707
Dentro dos grupos	1879,73031	28	67,13322534			
Total	2560,349173	29				

Tabela 17. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade (E_m) em ensaio de resistência à flexão estática, *posição edgewise*, nos painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3013797,689	1	3013797,689	56,26070493	6,92307E-05	5,317655063
Dentro dos grupos	428547,4479	8	53568,43098			
Total	3442345,137	9				

Tabela 18. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de ruptura (f_m) em ensaio de resistência à flexão estática, posição *edgewise*, nos painéis LVLs de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,419117274	1	2,419117274	0,216609528	0,654042584	5,317655063
Dentro dos grupos	89,3448149	8	11,16810186			
Total	91,76393218	9				

1.2. Ensaio de compressão paralela às fibras

Tabela 19. Análise de variância para o efeito da espécie na resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) em painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5466,728237	1	5466,728237	10,48075077	0,002504154	4,098171661
Dentro dos grupos	19820,68628	38	521,5970073			
Total	25287,41452	39				

1.3. Ensaio de cisalhamento paralelo e perpendicular às fibras

Tabela 20. Análise de variância para o efeito da espécie na resistência ao cisalhamento paralelo ($f_{v,0}$) à linha de cola para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	684,4293759	1	684,4293759	3,42580344	0,077658492	4,300949462
Dentro dos grupos	4395,303623	22	199,7865283			
Total	5079,732999	23				

Tabela 21. Análise de variância para o efeito da espécie na resistência ao cisalhamento perpendicular ($f_{v,90}$) à linha de cola para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,532207056	1	4,532207056	0,05086597	0,823645169	4,300949462
Dentro dos grupos	1960,221267	22	89,10096666			
Total	1964,753474	23				

1.4. Avaliações não-destrutivas (AND)

Tabela 22. Análise de variância para o efeito da espécie na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) em posição *flatwise* para painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	284056,5468	1	284056,5468	70,5125204	3,45855E-10	4,098171661
Dentro dos grupos	153081,3069	38	4028,455445			
Total	437137,8537	39				

Tabela 23. Análise de variância para o efeito da espécie na velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) em posição *edgewise* para painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	299638,5598	1	299638,5598	64,92443802	9,57491E-10	4,098171661
Dentro dos grupos	175377,1864	38	4615,189117			
Total	475015,7462	39				

Tabela 24. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) em posição *flatwise* para painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	980779681	1	980779681	30,65811428	2,45708E-06	4,098171661
Dentro dos grupos	1215652976	38	31990867,8			
Total	2196432657	39				

Tabela 25. Análise de variância para o efeito da espécie no módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) em posição *edgewise* para painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1009724827	1	1009724827	27,41781349	6,33448E-06	4,098171661
Dentro dos grupos	1399438488	38	36827328,62			
Total	2409163315	39				

1.5. Predição das propriedades mecânicas por avaliações não-destrutivas

Tabela 26. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa*.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	2555,466803	2555,466803	0,012547594	0,912521821
Resíduo	13	2647604,609	203661,893		
Total	14	2650160,075			

Tabela 27. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus kesiya*.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	2408829,359	2408829,359	14,40754367	0,002549551
Resíduo	12	2006306,763	167192,2303		
Total	13	4415136,122			

Tabela 28. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa*.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	62986,34051	62986,34051	0,316493019	0,583294631
Resíduo	13	2587173,735	199013,3642		
Total	14	2650160,075			

Tabela 29. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{md}) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus kesiya*.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	872459,5738	872459,5738	2,95525565	0,111263077
Resíduo	12	3542676,548	295223,0457		
Total	13	4415136,122			

Tabela 30. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa*.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	969,1820922	969,1820922	0,248850227	0,626220079
Resíduo	13	50630,32221	3894,64017		
Total	14	51599,50431			

Tabela 31. Análise de regressão linear entre o módulo de elasticidade (E_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus kesiya*.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	39337,21022	39337,21022	9,823235782	0,008624251
Resíduo	12	48054,07638	4004,506365		
Total	13	87391,2866			

Tabela 32. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa*.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	2549,880129	2549,880129	0,675814387	0,425853207
Resíduo	13	49049,62418	3773,048014		
Total	14	51599,50431			

Tabela 33. Análise de regressão linear entre o módulo de ruptura (f_m) e velocidade de propagação das ondas de tensão (V_0) para os painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus kesiya*.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	15371,84958	15371,84958	2,561283489	0,135491363
Resíduo	12	72019,43702	6001,619752		
Total	13	87391,2866			

2. Propriedades Físicas

2.1. Densidade

Tabela 34. Análise de variância para o efeito da espécie na densidade aparente para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000863936	1	0,000863936	3,771524283	0,059571834	4,098171661
Dentro dos grupos	0,008704592	38	0,000229068			
Total	0,009568529	39				

2.2. Absorção de água

Tabela 35. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de absorção de água no período de 2 horas de imersão em água nos painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1711,121067	1	1711,121067	199,199818	1,66181E-12	4,300949462
Dentro dos grupos	188,979407	22	8,589973046			
Total	1900,100474	23				

Tabela 36. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de absorção de água no período de 24 horas de imersão em água nos painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1498,565822	1	1498,565822	326,509676	1,09908E-14	4,300949462
Dentro dos grupos	100,9723463	22	4,589652106			
Total	1599,538168	23				

Tabela 37. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de absorção de água no período de 96 horas de imersão em água nos painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	728,2591366	1	728,2591366	68,58024693	3,31021E-08	4,300949462
Dentro dos grupos	233,6197626	22	10,61908012			
Total	961,8788991	23				

2.3. Inchamento em espessura

Tabela 38. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de inchamento em espessura no período de 2 horas de imersão em água para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	23,81023234	1	23,81023234	76,63399443	1,28202E-08	4,300949462
Dentro dos grupos	6,835414433	22	0,310700656			
Total	30,64564678	23				

Tabela 39. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de inchamento em espessura no período de 24 horas de imersão em água para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,89782172	1	3,89782172	9,927848381	0,004638374	4,300949462
Dentro dos grupos	8,637528955	22	0,392614952			
Total	12,53535067	23				

Tabela 40. Análise de variância para o efeito da espécie no ensaio de inchamento em espessura no período de 96 horas de imersão em água para os painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,491469143	1	0,491469143	1,517561662	0,230994066	4,300949462
Dentro dos grupos	7,124798555	22	0,32385448			
Total	7,616267698	23				

2.4. Taxa de não-retorno

Tabela 41. Análise de variância para o efeito da espécie sobre a taxa de não-retorno em painéis LVLs confeccionados com lâminas de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,509857627	1	7,509857627	54,88447555	2,06261E-07	4,300949462
Dentro dos grupos	3,010265947	22	0,13683027			
Total	10,52012357	23				

3. Propriedades Biológicas

3.1. Perda de massa em podridão branca

Tabela 42. Análise de variância para o efeito da espécie sobre a perda de massa (%) para o fungo de podridão branca *Trametes versicolor* em painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	30,37484284	1	30,37484284	3,613151956	0,064547044	4,084745651
Dentro dos grupos	336,2697524	40	8,406743811			
Total	366,6445953	41				

3.2. Perda de massa em podridão parda

Tabela 43. Análise de variância para o efeito da espécie sobre a perda de massa (%) para o fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum* em painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	289,5863686	1	289,5863686	2,437629251	0,126333067	4,084745651
Dentro dos grupos	4751,934585	40	118,7983646			
Total	5041,520954	41				

B. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Tabela 44. Dados para o ensaio de resistência à flexão estática.

Espécie	Painel	Repetição	Posição	E_m (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)
PO	1	1	<i>flatwise</i>	15395,84	91,60
PO	1	2	<i>flatwise</i>	15619,18	93,26
PO	1	3	<i>flatwise</i>	15361,62	85,23
PO	1	4	<i>flatwise</i>	15881,92	85,92
PO	1	5	<i>flatwise</i>	15848,30	80,07
PO	2	1	<i>flatwise</i>	16265,25	76,21
PO	2	2	<i>flatwise</i>	16985,64	91,60
PO	2	3	<i>flatwise</i>	16786,81	91,01
PO	2	4	<i>flatwise</i>	16874,10	92,19
PO	2	5	<i>flatwise</i>	16776,84	86,90
PO	3	1	<i>flatwise</i>	16548,66	83,54
PO	3	2	<i>flatwise</i>	15968,18	73,84
PO	3	3	<i>flatwise</i>	16351,89	72,56
PO	3	4	<i>flatwise</i>	16695,83	95,82
PO	3	5	<i>flatwise</i>	15630,75	73,80
PO	4	1	<i>edgewise</i>	16597,26	88,39
PO	4	2	<i>edgewise</i>	16101,25	92,21
PO	4	3	<i>edgewise</i>	16089,73	88,75
PO	4	4	<i>edgewise</i>	16028,10	93,43
PO	4	5	<i>edgewise</i>	15982,74	96,73
PK	1	1	<i>flatwise</i>	17735,12	106,01
PK	1	2	<i>flatwise</i>	17201,03	99,03
PK	1	3	<i>flatwise</i>	17122,10	101,67
PK	1	4	<i>flatwise</i>	17442,16	106,74
PK	1	5	<i>flatwise</i>	17103,19	92,75
PK	2	1	<i>flatwise</i>	16996,50	100,57
PK	2	2	<i>flatwise</i>	17802,85	99,96
PK	2	3	<i>flatwise</i>	17727,00	89,66
PK	2	4	<i>flatwise</i>	17203,77	93,52
PK	2	5	<i>flatwise</i>	16512,50	97,70
PK	3	1	<i>flatwise</i>	17641,96	87,86
PK	3	2	<i>flatwise</i>	16232,02	76,72
PK	3	3	<i>flatwise</i>	16049,22	82,18
PK	3	4	<i>flatwise</i>	16196,51	88,58
PK	3	5	<i>flatwise</i>	17338,19	93,50
PK	4	1	<i>edgewise</i>	14823,91	87,51
PK	4	2	<i>edgewise</i>	14871,07	93,89
PK	4	3	<i>edgewise</i>	15280,36	96,17
PK	4	4	<i>edgewise</i>	15259,93	93,71
PK	4	5	<i>edgewise</i>	15074,00	93,17

Tabela 45. Dados para a resistência à compressão paralela às fibras

Espécie	Painel	Repetição	$f_{c,0}$ (N/mm ²)
PO	1	1	55,37
PO	1	2	54,86
PO	1	3	53,57
PO	1	4	55,50
PO	1	5	53,37
PO	2	1	52,91
PO	2	2	52,53
PO	2	3	50,43
PO	2	4	52,10
PO	2	5	58,19
PO	3	1	56,49
PO	3	2	56,31
PO	3	3	52,80
PO	3	4	52,85
PO	3	5	53,82
PO	4	1	58,29
PO	4	2	56,36
PO	4	3	56,10
PO	4	4	55,15
PO	4	5	56,40
PK	1	1	59,11
PK	1	2	56,93
PK	1	3	53,11
PK	1	4	56,81
PK	1	5	56,37
PK	2	1	59,11
PK	2	2	60,36
PK	2	3	55,36
PK	2	4	58,96
PK	2	5	58,21
PK	3	1	61,15
PK	3	2	55,00
PK	3	3	57,12
PK	3	4	60,14
PK	3	5	54,30
PK	4	1	54,10
PK	4	2	56,15
PK	4	3	54,19
PK	4	4	54,85
PK	4	5	57,52

Tabela 46. Dados para a resistência ao cisalhamento paralelo e perpendicular às fibras.

Espécie	Painel	Repetição	$f_{gv,0}$ (N/mm ²)	$f_{gv,90}$ (N/mm ²)
PO	1	1	7,67	11,64
PO	1	2	8,15	12,91
PO	1	3	9,85	12,48
PO	2	1	9,86	11,33
PO	2	2	7,92	11,89
PO	2	3	11,50	12,75
PO	3	1	6,39	11,36
PO	3	2	8,09	12,28
PO	3	3	7,82	12,27
PO	4	1	9,97	12,64
PO	4	2	8,20	14,60
PO	4	3	9,58	12,98
PK	1	1	7,96	12,22
PK	1	2	11,32	12,28
PK	1	3	12,56	11,71
PK	2	1	9,12	12,53
PK	2	2	9,27	12,56
PK	2	3	10,08	12,87
PK	3	1	8,83	11,58
PK	3	2	10,79	11,73
PK	3	3	9,17	11,57
PK	4	1	10,84	12,57
PK	4	2	8,37	13,77
PK	4	3	9,16	14,75

Tabela 47. Dados para avaliação não-destrutiva (AND) posição *flatwise*.

Espécie	Painel	Repetição	V_0 (m/s)	E_{md} (N/mm ²)
PO	1	1	4874,27	16643,24
PO	1	2	4772,73	16214,81
PO	1	3	4781,78	16254,36
PO	1	4	4790,87	16523,61
PO	1	5	4772,73	16258,16
PO	2	1	4727,95	15696,47
PO	2	2	4772,73	16105,54
PO	2	3	4745,76	16274,95
PO	2	4	4883,72	17218,74
PO	2	5	4846,15	17102,30
PO	3	1	4763,71	16058,25
PO	3	2	4719,10	15995,61
PO	3	3	4727,95	16285,59
PO	3	4	4649,45	15796,30
PO	3	5	4790,87	16754,81
PO	4	1	4781,78	16819,55
PO	4	2	4790,87	17231,74
PO	4	3	4763,71	17054,69
PO	4	4	4763,71	16973,70
PO	4	5	4772,73	16983,15
PK	1	1	5000,00	18171,73
PK	1	2	5000,00	17430,63
PK	1	3	5000,00	17689,23
PK	1	4	5040,00	18040,35
PK	1	5	5050,10	18010,19
PK	2	1	4921,88	18080,00
PK	2	2	4931,51	17883,70
PK	2	3	5070,42	18419,53
PK	2	4	4980,24	17888,14
PK	2	5	4800,00	16485,02
PK	3	1	4950,88	17806,03
PK	3	2	4818,36	16394,15
PK	3	3	4874,27	17166,15
PK	3	4	4912,28	17452,30
PK	3	5	4921,88	17632,61
PK	4	1	4960,63	17092,02
PK	4	2	4864,86	16397,26
PK	4	3	4941,18	17414,25
PK	4	4	4883,72	16660,35
PK	4	5	4941,18	17399,32

Tabela 48. Dados para avaliação não-destrutiva (AND) posição *edgewise*.

Espécie	Painel	Repetição	V_0 (m/s)	E_{md} (N/mm ²)
PO	1	1	4710,28	15542,15
PO	1	2	4658,04	15444,90
PO	1	3	4606,95	15087,46
PO	1	4	4590,16	15168,12
PO	1	5	4736,84	16014,59
PO	2	1	4675,32	15348,95
PO	2	2	4598,54	14951,40
PO	2	3	4658,04	15678,85
PO	2	4	4781,78	16507,43
PO	2	5	4754,72	16463,01
PO	3	1	4666,67	15410,69
PO	3	2	4692,74	15817,38
PO	3	3	4606,95	15462,62
PO	3	4	4727,95	16334,26
PO	3	5	4666,67	15452,15
PO	4	1	4754,72	16629,67
PO	4	2	4590,16	15818,16
PO	4	3	4772,73	17119,35
PO	4	4	4701,49	16533,25
PO	4	5	4790,87	17112,54
PK	1	1	4902,72	17078,01
PK	1	2	4874,27	16565,06
PK	1	3	4912,28	17073,99
PK	1	4	4960,63	17476,62
PK	1	5	4941,18	17241,65
PK	2	1	4809,16	17261,38
PK	2	2	4883,72	17538,79
PK	2	3	4883,72	17088,02
PK	2	4	4970,41	17817,64
PK	2	5	4800,00	16485,01
PK	3	1	4790,87	16673,66
PK	3	2	4763,71	16024,36
PK	3	3	4800,00	16646,97
PK	3	4	4800,00	16663,60
PK	3	5	4800,00	16770,18
PK	4	1	4864,86	16438,46
PK	4	2	4931,51	16849,57
PK	4	3	4950,88	17482,74
PK	4	4	4763,71	15851,56
PK	4	5	4800,00	16419,27

Tabela 49. Dados para a densidade.

Espécie	Painel	Repetição	D (g/cm ³)
PO	1	1	0,706
PO	1	2	0,717
PO	1	3	0,716
PO	1	4	0,726
PO	1	5	0,719
PO	2	1	0,708
PO	2	2	0,713
PO	2	3	0,728
PO	2	4	0,728
PO	2	5	0,734
PO	3	1	0,713
PO	3	2	0,724
PO	3	3	0,734
PO	3	4	0,736
PO	3	5	0,736
PO	4	1	0,741
PO	4	2	0,757
PO	4	3	0,757
PO	4	4	0,754
PO	4	5	0,751
PK	1	1	0,733
PK	1	2	0,703
PK	1	3	0,713
PK	1	4	0,716
PK	1	5	0,712
PK	2	1	0,752
PK	2	2	0,741
PK	2	3	0,722
PK	2	4	0,727
PK	2	5	0,721
PK	3	1	0,732
PK	3	2	0,712
PK	3	3	0,728
PK	3	4	0,729
PK	3	5	0,734
PK	4	1	0,700
PK	4	2	0,698
PK	4	3	0,719
PK	4	4	0,704
PK	4	5	0,718

Tabela 50. Dados para a absorção de água.

Espécie	Painel	Repetição	ABS - 2 (%)	ABS - 24 (%)	ABS - 96 (%)
PO	1	1	11,58	23,15	33,46
PO	1	2	11,95	25,09	33,92
PO	1	3	12,28	24,68	33,95
PO	2	1	14,49	26,55	34,56
PO	2	2	12,35	25,11	45,97
PO	2	3	14,20	27,62	34,36
PO	3	1	11,92	23,85	33,46
PO	3	2	12,45	24,61	33,72
PO	3	3	12,58	24,26	34,12
PO	4	1	11,31	22,09	32,44
PO	4	2	12,15	22,62	31,69
PO	4	3	12,11	23,68	32,38
PK	1	1	32,98	43,35	47,94
PK	1	2	31,06	41,10	45,89
PK	1	3	31,18	44,88	50,63
PK	2	1	33,89	41,40	46,50
PK	2	2	27,10	38,22	44,34
PK	2	3	33,78	43,67	49,81
PK	3	1	28,63	38,33	43,69
PK	3	2	29,72	39,30	43,57
PK	3	3	30,46	39,11	43,37
PK	4	1	20,04	38,06	44,74
PK	4	2	28,85	38,83	43,99
PK	4	3	24,33	36,72	41,76

Tabela 51. Dados para o inchamento em espessura.

Espécie	Painel	Repetição	IE - 2 (%)	IE - 24 (%)	IE - 96 (%)
PO	1	1	1,33	3,54	4,67
PO	1	2	1,38	4,33	5,65
PO	1	3	1,49	3,73	4,91
PO	2	1	2,02	4,06	4,91
PO	2	2	1,81	4,63	6,05
PO	2	3	1,63	4,18	5,04
PO	3	1	1,31	3,68	4,82
PO	3	2	1,62	4,07	5,10
PO	3	3	1,34	3,70	4,84
PO	4	1	1,29	3,87	5,61
PO	4	2	1,70	4,11	5,91
PO	4	3	1,58	4,70	6,08
PK	1	1	3,79	4,88	5,07
PK	1	2	4,52	5,43	5,56
PK	1	3	3,73	4,96	5,31
PK	2	1	4,89	5,99	6,20
PK	2	2	3,16	4,81	5,26
PK	2	3	3,18	4,33	4,72
PK	3	1	3,05	4,19	4,48
PK	3	2	4,00	6,46	5,18
PK	3	3	4,00	5,15	5,46
PK	4	1	2,24	4,15	4,44
PK	4	2	2,91	3,77	3,96
PK	4	3	2,95	4,18	4,55

Tabela 52. Dados para a taxa de não-retorno em espessura.

Espécie	Painel	Repetição	TNRE (%)
PO	1	1	1,89
PO	1	2	1,94
PO	1	3	2,02
PO	2	1	2,26
PO	2	2	2,06
PO	2	3	2,23
PO	3	1	1,89
PO	3	2	2,16
PO	3	3	1,77
PO	4	1	1,63
PO	4	2	1,79
PO	4	3	1,95
PK	1	1	3,14
PK	1	2	3,19
PK	1	3	2,92
PK	2	1	3,43
PK	2	2	2,76
PK	2	3	2,71
PK	3	1	2,84
PK	3	2	4,44
PK	3	3	3,13
PK	4	1	2,82
PK	4	2	2,62
PK	4	3	3,00

Tabela 53. Dados para a perda de massa.

Espécie	Repetição	<i>PMPB</i> (%)	<i>PMPP</i> (%)	<i>PMTest.</i> (%)
PO	1	4,62	31,10	2,37
PO	2	5,06	37,55	1,81
PO	3	2,32	34,39	2,93
PO	4	2,62	3,43	2,34
PO	5	7,05	38,91	2,58
PO	6	6,20	8,04	2,05
PO	7	6,97	31,11	1,08
PO	8	3,46	32,88	1,85
PO	9	18,34	30,54	0,74
PO	10	4,61	36,09	1,88
PO	11	3,44	37,21	2,38
PO	12	7,94	35,45	2,21
PO	13	4,75	24,26	-
PO	14	4,04	33,87	-
PO	15	6,79	27,22	-
PO	16	4,49	34,13	-
PO	17	2,68	18,83	-
PO	18	4,72	8,68	-
PO	19	3,56	15,95	-
PO	20	3,93	28,55	-
PO	21	4,05	9,73	-
PO	22	3,65	4,84	-
PO	23	2,60	28,53	-
PO	24	4,29	20,22	-
PK	1	4,42	20,28	1,36
PK	2	1,26	29,03	1,55
PK	3	0,71	2,74	0,83
PK	4	7,76	23,84	1,70
PK	5	2,39	2,90	1,32
PK	6	6,90	24,32	1,29
PK	7	2,81	10,92	1,30
PK	8	4,57	14,28	1,10
PK	9	1,15	32,44	1,19
PK	10	1,01	3,98	1,12
PK	11	0,20	29,03	1,45
PK	12	5,33	20,22	1,55
PK	13	2,24	26,63	-
PK	14	6,13	38,34	-
PK	15	7,27	15,52	-
PK	16	1,75	18,01	-
PK	17	2,75	26,16	-
PK	18	2,07	24,48	-

Onde: *PMPB* – Perda de massa em podridão branca, *PMPP* – Perda de massa em podridão parda e *PMTest.* – Perda de massa nas testemunhas (sem ataque biológico).