

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PAINÉIS LVL DE PINUS
TROPICAIS DA REGIÃO DE SÃO PAULO**

MARIA SÍLVIA CHIARADIA GABRIEL

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia
(Energia na Agricultura)

BOTUCATU - SP

Novembro - 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PAINÉIS LVL DE PINUS
TROPICAIS DA REGIÃO DE SÃO PAULO**

MARIA SÍLVIA CHIARADIA GABRIEL

Orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Co-Orientador: Prof. Dr. Hernando Alfonso Lara Palma

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia
(Energia na Agricultura)

BOTUCATU - SP
Novembro - 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G118d Gabriel, Maria Sílvia Chiaradia, 1970-
Desempenho físico-mecânico de painéis de LVL de pinus tropicais da região
de São Paulo / Maria Sílvia Chiaradia Gabriel. - Botucatu : [s.n.], 2007.
ix, 125 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Fa-
culdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007

Orientador: Adriano Wagner Ballarin

Co-orientador: Hernando Alfonso Lara Palma

Inclui bibliografia.

1. Painéis de madeira - Propriedades mecânicas. 2. Pinus tropicais. 3.
Madeira laminada. 4. LVL (Laminated veneer lumber). I. Ballarin, Adriano
Wagner. II. Lara Palma, Her-nando Alfonso. III. Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ci-
ências Agrônômicas. IV. Título.

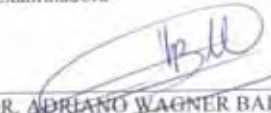
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PAINÉIS LVL DE PINUS
TROPICAIS DA REGIÃO DE SÃO PAULO"

ALUNA: MARIA SILVIA CHIARADIA GABRIEL

ORIENTADOR: PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN


Aprovado pela Comissão Examinadora



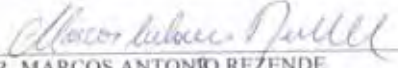
PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN



PROF. DR. TAKASHI YOJO



PROF. DR. LUIZ ANTONIO VASQUES HELLMEISTER



PROF. DR. MARCOS ANTONIO REZENDE



PROF. DR. VLADIMIR ELIODORO COSTA

Data da Realização: 21 de novembro de 2007.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin, orientador desta tese, por todo empenho, sabedoria, compreensão, exigência e acima de tudo, pela grande amizade. Minha eterna gratidão e carinho.

Ao Prof. Dr. Hernando Alfonso Lara Palma, co-orientador desta tese, por direcionar a execução desta pesquisa, por me ajudar a enriquecer esse trabalho, e principalmente por sua inestimável amizade.

Aos meus pais, Jairo e Maria Lúcia, por me incentivarem a seguir em frente, mesmo nos momentos difíceis.

Ao Leandro Hachuy, pelo apoio, compreensão e companheirismo em todos os momentos.

Aos professores Dr. Alcides Lopes Leão e Dr. Vladimir Eliodoro Costa por participarem de minha banca de qualificação, por me ajudarem a enriquecer esse trabalho, através de suas largas experiências.

Ao professor do IBB/UNESP MSc. Luciano Barbosa que sempre me atendeu com presteza, na condução da análise estatística.

À Indústria de Compensados Caribeia S.A. pela confecção dos painéis utilizados para o desenvolvimento desta tese.

Ao Sr. Guilherme Greggio, proprietário da Indústria de Compensados Caribeia S.A., pela colaboração e amizade.

Ao Dr. Marcelo Nogueira, da Universidade Federal do Espírito Santo, pelo companheirismo e amizade.

Ao Aílton de Lima Lucas pela colaboração na execução dos ensaios, e pela amizade que firmamos nesse tempo de convivência.

Ao Sílvio Santi e ao José Luiz Cavallari, funcionários da marcenaria da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, pela disponibilidade e esmero na confecção dos corpos-de-prova.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural e do Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela disponibilidade em ajudar sempre, e pela grande amizade.

A todos os colegas da Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pelos incentivos, pelo companheirismo e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – por ter acreditado na concepção deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	5
4. OBJETIVOS	8
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
5.1 Definição	9
5.2 Usos e mercado do LVL	10
5.3 Espécies utilizadas na produção de LVL	12
5.4 Processo de produção do LVL	14
5.4.1 Laminação, secagem, classificação e arranjo de lâminas	16
5.4.2 Colagem e prensagem	17
5.5 Vantagens dos painéis LVL	18
5.6 Propriedades físicas e mecânicas dos LVL	18
5.7 Técnicas de avaliação não-destrutiva de propriedades de madeira	21
5.7.1 Método das ondas de tensão	22
5.7.2 Método do ultra-som	24
6. MATERIAL E MÉTODOS	28
6.1 Espécies estudadas	28
6.2 Ensaio preliminares	28
6.2.1 Variação do módulo de elasticidade dinâmico em lâminas	29
6.2.2 Tempo e temperatura de prensagem dos painéis LVL	29
6.3 Fabricação de painéis LVL para o estudo	35
6.3.1 Classificação de lâminas secas	36
6.3.2 Produção e montagem dos painéis LVL	38
6.4 Ensaio não-destrutivos dos painéis LVL	41
6.5 Ensaio em corpos-de-prova dos painéis	41
6.5.1 Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia	45
6.5.2 Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia	49
6.5.3 Ensaio de compressão paralela às fibras	50
6.5.4 Ensaio de compressão perpendicular às fibras	51
6.5.5 Ensaio de cisalhamento longitudinal	52
6.5.6 Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento – painel de 13 lâminas	53
6.6 Cálculo do módulo de elasticidade teórico dos painéis LVL - corpos-de-prova - com uso da homogeneização da seção transversal	54
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
7.1 Ensaio preliminares	56
7.1.1 Variação do módulo de elasticidade dinâmico nas bordas e centro dos painéis	56
7.1.2 Tempo e temperatura de prensagem dos painéis LVL laboratoriais ..	58

	Página
7.1.3 Tempo e temperatura de prensagem dos painéis LVL de dimensões comerciais	61
7.2 Classificação das lâminas – ensaios principais.....	63
7.3 Propriedades físicas de painéis LVL de 13 lâminas	64
7.3.1 Resultados obtidos nos painéis	64
7.3.1.1 Empenamento.....	64
7.3.1.2 Densidade aparente	65
7.3.2 Resultados obtidos nos corpos-de-prova	67
7.4 Propriedades mecânicas dos painéis LVL de 13 lâminas.....	68
7.4.1 Resultados obtidos por ensaios não-destrutivos nos painéis	68
7.4.1.1 Método das ondas de tensão.....	68
7.4.1.2 Método do ultra-som	70
7.4.2 Resultados obtidos por ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova	72
7.4.2.1 Método do ultra-som	72
7.4.3 Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova dos painéis.....	73
7.4.3.1 Flexão estática longitudinal.....	73
7.4.3.2 Flexão estática transversal.....	75
7.4.3.3 Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento	77
7.5 Propriedades físicas dos painéis LVL de 25 lâminas	80
7.5.1 Resultados obtidos nos painéis	80
7.5.1.1 Densidade aparente	80
7.5.2 Resultados obtidos nos corpos-de-prova	81
7.5.2.1 Teor de umidade.....	81
7.5.2.2 Densidade aparente	82
7.6 Propriedades mecânicas dos painéis LVL de 25 lâminas.....	83
7.6.1 Resultados obtidos por ensaios não-destrutivos nos painéis	83
7.6.1.1 Método das ondas de tensão.....	83
7.6.1.2 Método do ultra-som	85
7.6.2 Ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova	86
7.6.2.1 Método das ondas de tensão.....	86
7.6.2.2 Método de ultra-som	88
7.6.3 Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova dos painéis	90
7.6.3.1 Flexão estática na condição de menor inércia (<i>flatwise</i>).....	90
7.6.3.2 Flexão estática na condição de maior inércia (<i>edgewise</i>)	95
7.6.3.3 Cisalhamento longitudinal.....	96
7.6.3.4 Compressão paralela às fibras	98
7.6.3.5 Compressão perpendicular às fibras.....	99
7.7 Associações entre as variáveis mensuradas nos ensaios não-destrutivos em painéis e em corpos-de-prova	99
7.7.1 Painel de 13 lâminas.....	100
7.7.2 Painel de 25 lâminas.....	100
7.8 Associações entre as variáveis mensuradas nos ensaios não-destrutivos e em ensaios destrutivos	103
7.8.1 Painel de 13 lâminas.....	103
7.8.2 Painel de 25 lâminas.....	104

	Página
7.9 Módulo de elasticidade teórico (seção homogeneizada)	106
7.10 Compilação dos resultados obtidos	110
8. CONCLUSÕES	115
9. REFERÊNCIAS	117

LISTA DE QUADROS

		Página
1	Espécies utilizadas na produção de LVL.....	13
2	Valores característicos de ensaios para o desempenho de painéis LVL previamente classificados pela APA EWS	19
3	Valores da resistência de cálculo e rigidez para produtos de madeira estrutural	20
4	Valores médios da densidade e das propriedades mecânicas de madeira de coníferas	21
5	Distribuição dos termopares nos painéis LVL.....	31
6	Tempos de prensagem dos painéis LVL laboratoriais e comerciais.....	33
7	Ensaio e normas – painéis LVL de 25 lâminas	42
8	Ensaio e normas – painéis LVL de 13 lâminas	43
9	Ensaio preliminar - Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) obtidos com mensurações no centro e nas bordas das lâminas.	56
10	Ensaio preliminar - Resultados principais para o teste de comparação de médias - mensuração do módulo dinâmico na borda e no centro da lâmina	57
11	Valores de algumas propriedades das lâminas.	63
12	Painel de 13 lâminas - empenamento	65
13	Painel de 13 lâminas - Valores da densidade aparente.	66
14	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores da densidade aparente.	67
15	Corpos-de-prova- Painel de 13 lâminas– Valores da umidade.....	67
16	Corpos-de-prova– Painel de 13 lâminas – Valores de absorção de água	68
17	Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel.....	69
18	Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel.....	69
19	Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção transversal do painel.....	69
20	Painel de 13 lâminas – Valores da de módulo de elasticidade dinâmico obtidos pelo método de ondas de tensão na direção transversal.....	70
21	Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som na direção longitudinal do painel	70
22	Painel de 13 lâminas – Valores da constante dinâmico obtidos pelo método de ultra-som na direção longitudinal do painel.....	71
23	Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som na direção transversal do painel	71
24	Painel de 13 lâminas – Valores de constante dinâmico obtidos pelo método de ultra-som na direção transversal do painel.....	71
25	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som	72
26	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores da constante dinâmico obtidos pelo método do ultra-som	73

	Página
27	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência à flexão estática na direção longitudinal 73
28	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade à flexão estática na direção longitudinal..... 74
29	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência à flexão estática na direção transversal 75
30	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade à flexão estática na direção transversal..... 75
31	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento na condição seca 77
32	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e porcentagem de falha na madeira após umedecimento em água fria 78
33	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e porcentagem de falha na madeira após umedecimento em água quente (estado de fervura) 78
34	Requisitos de colagem (valores médios) 79
35	Painel de 25 lâminas – Valores de densidade aparente 80
36	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de umidade..... 81
37	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de densidade aparente..... 82
38	Painel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel..... 83
39	Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel..... 84
40	Painel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção transversal do painel..... 84
41	Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão na direção transversal do painel..... 84
42	Painel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultrassom na direção longitudinal do painel 85
43	Painel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultrassom na direção longitudinal do painel..... 85
44	Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ultrassom na direção transversal do painel 85
45	Painel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultrassom na direção transversal do painel..... 86
46	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática <i>flatwise</i> 86
47	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores do módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática <i>flatwise</i> 87
48	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática <i>edgewise</i> 87
49	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores do módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática <i>edgewise</i> 87

	Página
50	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática <i>flatwise</i> 88
51	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática <i>flatwise</i> 89
52	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo metodo de ultra-som em c.p.de flexão estática <i>edgewise</i> 89
53	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática <i>edgewise</i> 89
54	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de resistência à flexão estática dos c.p. <i>flatwise</i> 90
55	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dos c.p. <i>flatwise</i> submetidos à flexão estática..... 90
56	Valores característicos de algumas resistências mecânicas e módulo de elasticidade estático para LVL produzidos pela Nelson Pine 93
57	Valores médios de resistência à flexão estática nas condições de maior e menor inércia (<i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>) e módulo de elasticidade para LVL de 2x4”, confeccionados a partir de lâminas de madeira juvenil (MJ) e adulta (MA) de Southern Pine e Douglas-fir..... 94
58	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de resistência à flexão estática dos c.p. <i>edgewise</i> 95
59	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dos c.p. <i>edgewise</i> submetidos à flexão estática 95
60	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de resistência ao cisalhamento longitudinal..... 97
61	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de resistência à compressão paralela às fibras 98
62	Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de carga atingida quando deformação atinge 2.5 mm na compressão perpendicular às fibras 99
63	Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade à flexão estática na direção longitudinal e módulo de elasticidade teórico (E_T)..... 107
64	Corpos-de-prova – Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dos c.p. <i>flatwise</i> submetidos à flexão estática e módulo de elasticidade teórico (E_T) 107
65	Painéis de 13 e 25 lâminas – características de suas produções 111

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Ensaio preliminares - Medição do módulo de elasticidade nas lâminas	29
2 Instalação dos termopares no painel	31
3 Instalação dos termopares no painel comercial	35
4 Qualidade das lâminas para painéis LVL	37
5 Ensaio não-destrutivos nas lâminas	38
6 Fabricação de painéis LVL	40
7 Representação esquemática da posição dos corpos-de-prova nos painéis de 25 lâminas	44
8 Representação esquemática da posição dos corpos-de-prova nos painéis de 13 lâminas	44
9 Ensaio não-destrutivos de ondas de tensão e ultra-som	45
10 Painel com 25 lâminas - Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia	46
11 Painel com 13 lâminas - Ensaio de flexão estática (c.p. longitudinal) em relação ao eixo de menor inércia	48
12 Painel de 25 lâminas - Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia – <i>edgewise</i>	50
13 Painel de 25 lâminas - Ensaio de compressão paralela às fibras	51
14 Painel de 25 lâminas - Ensaio de compressão perpendicular às fibras	52
15 Painel de 25 lâminas - Ensaio de cisalhamento longitudinal	52
16 Painel de 13 lâminas - Ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento	53
17 Esquema da seção transversal de um painel LVL para o cálculo do E_T	54
18 Ensaio preliminares - Módulo de elasticidade do centro e das bordas das lâminas	57
19 Ensaio preliminares - LVL 9 - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem	58
20 Ensaio preliminares - LVL 17A - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem	59
21 Ensaio preliminares - LVL 17B - Variação da temperatura nas diferentes linhas de cola em relação ao tempo de prensagem	60
22 Ensaio preliminares - LVL comercial 15 - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem	62
23 Ensaio preliminares - LVL comercial 25B - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem	62
24 Dispersão dos valores da constante dinâmica (C_{LL})- figura 24 a) módulo de elasticidade dinâmico (E_d) - figura 24 b) obtida na análise das 500 lâminas utilizadas nos ensaios principais	64
25 Painel 13 - Variações da densidade aparente e da resistência à flexão dos quatro tratamentos, nas direções longitudinal e transversal.	76
26 Painel - 13 Variações da densidade aparente e do módulo de elasticidade dos quatro tratamentos, nas direções longitudinal e transversal	76

	Página
27 Painel 25 - Variações da densidade aparente e da resistência à flexão dos quatro tratamentos, nas posições de maior e de menor inércia.	91
28 Painel 25 - Variações da densidade aparente e do módulo de elasticidade dos quatro tratamentos, nas posições de maior e de menor inércia.	91
29 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 13 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som no painel e nos corpos-de-prova; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) no painel do nos corpos-de-prova	100
30 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão no painel e nos corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i> ; b) Regressão linear entre o módulo dinâmico (E_d) no painel do nos corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i>	101
31 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão no painel e nos corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i> ; b) Regressão linear entre o módulo dinâmico (E_d) no painel do nos corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i>	101
32 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som no painel e nos corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i> ; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) no painel do nos corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i>	102
33 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som no painel e nos corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i> ; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) no painel do nos corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i>	102
34 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 13 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova.....	103
35 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i> ; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i>	104
36 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i> ; b) Regressão linear entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>flatwise</i>	104

	Página
37 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i> ; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i>	105
38 Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i> ; b) Regressão linear entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios <i>edgewise</i>	106
39 Painel de 13 lâminas - Tendência dos valores do módulo de elasticidade estático e teórico para os quatro tratamentos	108
40 Painel de 25 lâminas - Tendência dos valores do módulo de elasticidade estático e teórico para os quatro tratamentos	109

1. RESUMO

Este trabalho teve por objetivo principal a avaliação do desempenho físico-mecânico de painéis de lâminas paralelas LVL (Laminated venner lumber) de Pinus tropicais, classificando-se as lâminas em classes de qualidade (baixo e alto módulos de elasticidade), usando-se para isto métodos não-destrutivos, como ultra-som e ondas de tensão.

As avaliações foram realizadas em painéis com lâminas de espessura de 2,2 mm, provenientes da Indústria de Madeiras Caribea Ltda., localizada no município de São Manuel, SP. Foram confeccionados painéis LVL de 13 e 25 lâminas, com quatro tipos de tratamento, com as lâminas previamente classificadas:

- a) T1-LVL homogêneo 1 (produzido somente com lâminas classificadas com alto módulo de elasticidade dinâmico)
- b) T2-LVL homogêneo 2 (produzido somente com lâminas classificadas com baixo módulo de elasticidade dinâmico)
- c) T3-LVL com lâminas combinadas (lâminas de alto módulo de elasticidade dinâmico na capa e contracapa e baixo módulo de elasticidade dinâmico no miolo)
- d) T4-LVL não homogêneo (com lâminas alternadas – uma com alto módulo, e outra com baixo módulo de elasticidade alternadamente)

As propriedades dos painéis foram avaliadas pelos métodos não-destrutivos de ondas de tensão (*stress wave method*) e ultra-som, determinando-se, respectivamente, o módulo dinâmico (E_d) e a constante dinâmica (C_{LL}) de cada painel. Com os corpos-de-prova retirados dos painéis foram realizados ensaios de flexão estática,

cisalhamento longitudinal, compressão paralela e perpendicular às fibras, resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, teor de umidade e densidade, seguindo-se as recomendações das normas ASTM 5456 e o Projeto 31:000.05-001/3 para Painéis de madeira compensada, da ABNT.

Na avaliação da qualidade dos painéis os valores médios das propriedades do LVL foram comparados com as especificações das normas americanas e européias utilizadas para este produto, normas brasileiras para madeira serrada de coníferas e também com os valores obtidos em outros estudos encontrados na literatura.

De uma análise global dos resultados obtidos concluiu-se que os painéis LVL puderam ser produzidos industrialmente, utilizando-se os mesmos equipamentos e variáveis gerais do processo de fabricação de compensados. Foi possível separar as lâminas de diferentes qualidades com uso de ensaios não-destrutivos de ondas de tensão e ultra-som, sendo que o método do ultra-som revelou-se de maior praticidade relativa. Os resultados evidenciaram, ainda, que, no geral, os tratamentos com melhor desempenho foram os T1 e T4. Para os painéis LVL de 13 lâminas, justificou-se, em termos de rigidez, a disposição de lâminas de maior módulo de elasticidade na face e contra-face dos painéis, já que o tratamento estatístico T3 teve desempenho de rigidez superior ao tratamento T4. Para os painéis LVL de 25 lâminas, não se justificou, em termos de resistência e rigidez à flexão em relação a qualquer dos dois eixos principais (de menor e de maior inércia), a disposição de lâminas de maior módulo de elasticidade na face e contra-face dos painéis, uma vez que o tratamento estatístico T3 não apresentou desempenho de resistência superior ao tratamento T4.

Palavras-chave: LVL, Pinus tropicais, método do ultra-som.

PHYSICAL AND MECHANICAL PERFORMANCE OF LVL BOARDS MADE FROM TROPICAL PINUS OF SÃO PAULO. Botucatu, 2007. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARIA SÍLVIA CHIARADIA GABRIEL

Advisers: ADRIANO WAGNER BALLARIN

HERNANDO ALFONSO DE LARA PALMA

2. ABSTRACT

This paper had the main objective of evaluating physical and mechanical performance of LVL panels made from tropical pinus, with the previous classification of the veneers according to its MOE (high and low modulus of elasticity), obtained from non-destructive tests (ultrasound and stress wave methods).

Evaluations were carried in commercial dimension panels made with 2,2 mm thick veneers from “Industria de Madeiras Caribea Ltda”, located at Sao Manuel, São Paulo State, southeast of Brazil. Panels with 13 and 25 veneer were made considering four distinct treatments (three boards for each thickness and treatment) as follows:

- a) T1 (homogeneous superior) – LVL made entirely of higher MOE veneer;
- b) T2 (homogeneous inferior) – LVL made entirely of low-grade MOE veneer;
- c) T3 (rational) – LVL made with higher MOE in face veneer and lower MOE in core veneer;
- d) T4 (combined) – boards made with combined and alternated veneer with higher and lower MOE.

Panels were submitted to non-destructive evaluation, in order to obtain their dynamic modulus of elasticity (E_d – stress wave method) and dynamic constant (C_{LL} – ultrasound method). Specimens of the boards were tested under static bending, longitudinal shear, compression parallel and normal to the grain. For all specimens were evaluated density and humidity. All physical and mechanical tests were done according to ASTM D 5456 Code and CE 31:000.05-001/1 – First draft of the new Brazilian Code for Plywood.

In the evaluation of their quality, mean values of the panels properties were compared to American and European LVL code specification, Brazilian code specification for sawn lumber and other performance minimum values for LVL panels reported on scientific and technical literature.

In a global analysis of the results it could be concluded that it was possible to produce the LVL panels in an industry with the same equipment and main variables used to plywood production. Non-destructive tests on the veneers made possible the separation of distinct quality veneers and ultrasound method revealed to be more practice.

Results also revealed that treatments T1 and T4 had the best global performance. For 13 veneer panels it was justified, in terms of rigidity (MOE) the usage of the rational disposition of the veneers (higher MOE in face veneer). For the panels LVL of 25 veneers, was not justified, in resistance terms and rigidity to the flexing in relation to any of the two main axes (of minor and of larger inertia), the disposition of sheets of larger module of elasticity in the face and against-face of the panels, once the statistical treatment T3 didn't present acting of superior resistance to the treatment T4.

Keywords: LVL, tropical pinus, ultrasound method.

3. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista da tecnologia dos produtos florestais e em uma análise bastante simplificada e didática, pode-se dizer que a madeira vivencia hoje uma terceira geração de sua evolução.

A primeira geração é composta dos produtos de madeira roliça (*round timber*), com processamento elementar, consistindo basicamente de uma segmentação (eventual) do fuste da árvore, ao longo de seu comprimento. Tais produtos são empregados, de forma temporária, em escoramentos de lajes (pontaletes) e construção de andaimes e de forma permanente com elementos de maior diâmetro e resistência, como nos postes de distribuição de energia elétrica. Em construções rurais, é freqüente o seu uso em estruturas de telhado e outros componentes construtivos.

A segunda geração compreende os produtos de madeira serrada, eventualmente dimensionada e aplainada (*lumber e structural lumber*), do qual fazem parte as pranchas, colunas, vigas, tábuas, caibros, ripas, entre outros, que têm uso corrente no Brasil, sobretudo na construção civil.

A terceira geração compreende uma grande variedade de produtos florestais que podem ser agrupados sob o título genérico “produtos engenheirados à base de madeira” (*Engineered wood products*). São produtos à base de madeira que passaram, em maior ou menor grau, por um processo industrial que os reduz a frações ou componentes mais elementares ou convenientes, para posterior reconstituição mais favorável.

Segundo McKeever (1997), nessa geração de produtos, incluem-se hoje os compostos estruturais de madeira (LVL – *Laminated veneer lumber*, PSL – *Parallel strand lumber* e LSL – *Laminated strand lumber*), os painéis estruturais (compensado e OSB – *Oriented Strand Board*), painéis não-estruturais (MDF – *Medium density fiberboard* – e as chapas de partículas), além de produtos como a madeira laminada colada e as vigas estruturais *I-joists*. Diversos desses produtos não estão disponíveis atualmente no mercado nacional.

Dentre os produtos engenheirados destaca-se o painel de lâminas paralelas LVL que é um material composto de lâminas de madeira unidas por adesivo e orientadas na mesma direção, utilizado com grande versatilidade em soluções estruturais, onde grande resistência à flexão é requerida. O painel LVL representa atualmente uma nova tecnologia na utilização racional da madeira, especificamente para usos estruturais de grandes dimensões, tais como vigas e elementos de sustentação e, também, em aplicações não-estruturais como componentes de mobiliário, pisos ou elementos onde seja necessária a utilização na forma e dimensões de painéis (degraus de escadas, por exemplo).

O crescimento percentual do LVL no mercado mundial é muito significativo, tendo, nos últimos anos, triplicado seu consumo nos Estados Unidos e duplicado na Europa. O LVL tende a substituir alguns produtos de madeira serrada, como também dividir espaço comercial com aglomerados, MDF e o compensado convencional.

Por outro lado, no Brasil a utilização de matéria-prima de pinus proveniente de reflorestamentos na indústria madeireira tem sido crescente nos últimos anos. As estimativas indicam que, do volume de madeira serrada produzida no país, mais de 35% é formado de madeira de pinus, seja como produto para usos nobres ou como produto de menor valor agregado. Na produção de compensados esta participação corresponde a aproximadamente 70%, portanto, trata-se de uma espécie importante para o fornecimento de matéria-prima, especialmente na região sul e sudeste do país (ABIMCI, 2007). Apesar desta grande potencialidade, no Brasil, excluindo-se o compensado, poucas são as pesquisas sobre a utilização de lâminas de madeira de espécies reflorestadas na produção de outros materiais à base de madeira com maior valor agregado.

O LVL, em particular, tem sido estudado extensivamente no exterior, gerando grande quantidade de documentos técnico-científicos relacionados à produção e qualidade deste material. O Brasil ainda não produz o LVL industrialmente, razão pela qual

este produto vem sendo foco de pesquisas acadêmicas em alguns laboratórios e centros de pesquisas, como os Laboratórios de Qualidade e Painéis de Madeira e de Ensaio de Materiais da FCA-UNESP-Botucatu.

O conhecimento das propriedades básicas (físicas e mecânicas), sobretudo de painéis produzidos industrialmente faz-se indispensável, com o intuito de caracterizar este novo produto, visando principalmente garantir um subsídio a futuros usuários, para seu emprego correto em diferentes soluções estruturais.

4. OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo geral avaliar o desempenho físico-mecânico de painéis de lâminas paralelas LVL de dimensões comerciais.

O trabalho teve, ainda, os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a qualidade das lâminas por meio de ensaios não-destrutivos de ultra-som e de ondas de tensão;
- avaliar o desempenho relativo de painéis LVL produzidos com e sem a classificação prévia das lâminas que o compõem;
- analisar o tempo de prensagem e o comportamento do fluxo de calor (temperatura) através da espessura do painel, para estimar o tempo de cura do adesivo, em escala laboratorial e industrial; e
- calcular o módulo de elasticidade teórico dos painéis LVL (corpos-de-prova) com uso da homogeneização da seção transversal.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Definição

O LVL é um produto de madeira em forma de painel, composto de lâminas de madeira coladas todas na mesma direção. No Brasil, eventualmente, recebe a denominação PLP (Painel de lâminas paralelas). Este composto é fabricado com as mesmas dimensões e formatos dos painéis compensados convencionais, ou seja, 1200 mm de largura e 2400 mm de comprimento, ou em pranchas ou placas contínuas de até 25 m de comprimento, a partir das quais se obtém elementos estruturais de acordo com as dimensões requeridas pelo cliente (AITIM, 1999 e EWS, 2000).

Segundo Raute Engineered Wood (1980) e Tammela (1998), o LVL é um produto estrutural de alta qualidade, com propriedades físicas e mecânicas uniformes e com grande flexibilidade dimensional, características que o fazem ser um material com propriedades superiores ao compensado, à madeira serrada em geral, às vigas laminadas (*glulam*), principalmente quando utilizado em estruturas com grandes vãos. Reportando-se à situação internacional, os autores colocam que o LVL pode ser fabricado em uma grande variedade de formas e tamanhos, fazendo-o um produto de grande versatilidade, inclusive em aplicações não-estruturais.

As lâminas utilizadas na composição do LVL são geralmente obtidas por desenrolo em tornos convencionais e suas espessuras variam entre 2,5 mm e 4,0 mm. Na fabricação dos painéis LVL, durante o processo de montagem, há uma dispersão de elementos

redutores da resistência através da composição das lâminas, como os nós, proporcionando assim ao painel propriedades de resistência e rigidez superiores ao da madeira sólida original.

5.2 Usos e mercado do LVL

O LVL foi desenvolvido originalmente como opção à madeira serrada, particularmente nas aplicações estruturais com grandes vãos. O uso corrente do LVL tem sido em aplicações residenciais e comerciais, tais como: vigas, batentes de portas e janelas, vigas de pisos, estruturas de telhados, confecção de paredes estruturais e não-estruturais, escadas, partes de móveis e flanges de vigas tipo I (RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980 e McKEEVER, 1997).

As características técnicas, o adesivo utilizado e a aparência do produto são aspectos que dividem os painéis LVL em duas categorias distintas: LVL estrutural, com capacidade de carga, e LVL não-estrutural, sem capacidade nominal de carga (RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980; TAMMELA, 1998; AITIM, 1999).

O LVL estrutural é um produto sofisticado e com características técnicas superiores à madeira comum quanto à qualidade, estabilidade, flexibilidade de medidas e retidão. Estas características fazem do LVL uma alternativa insubstituível quando comparado a outros componentes estruturais de madeira serrada convencional.

Comparado com a madeira serrada, o LVL estrutural pode oferecer um espectro maior de dimensões, com espessuras médias variando de 21 mm a 75 mm; em casos especiais pode atingir até 150 mm, larguras de 100 mm a 1800 mm e comprimentos de 2,5 a 25 m (AITIM, 1999).

O LVL não-estrutural é um produto indicado para usos onde as características estéticas são de interesse, não sendo recomendado em aplicações onde se exige desempenho estrutural. Normalmente, estes painéis são utilizados em aplicações que precisam de superfícies de qualidade, uniformes e de fácil trabalhabilidade.

As dimensões do LVL decorativo variam de 5 mm a 50 mm na espessura, 75 mm a 1200 mm na largura e de 0,3 a 6,0 m de comprimento. As lâminas utilizadas na fabricação destes painéis são produzidas com espessuras de 1,5 mm a 5 mm (AITIM, 1999).

Segundo Raute Engineered Wood (1980), casas de madeiras podem ser construídas quase totalmente com produtos de LVL. As vigas de LVL podem ser utilizadas na estrutura dos pisos e tetos interiores e exteriores, e os painéis LVL para elementos estruturais de paredes e contratetos de interior e exterior. Devido à sua grande versatilidade, o LVL pode ser utilizado também na construção de móveis maciços, container e elementos estruturais de caminhões.

A principal característica dos painéis LVL é, portanto, a sua versatilidade de dimensões, que atende às necessidades de cada cliente.

Segundo Eckelman e Picado (1993) e Eckelman (1993), o uso do LVL em móveis não é recente; vem sendo utilizado como elementos laminados curvos, elementos de suporte interno e componentes planos (tampos, laterais, etc.). A grande gama de utilização do LVL na indústria de móveis deve-se principalmente às características estéticas e a razões econômicas que este produto oferece. Os painéis LVL apresentam grande semelhança em aparência e características de acabamento superficial com a madeira sólida original.

Embora o LVL tenha sido desenvolvido originalmente nos Estados Unidos principalmente para usos em construções civis, hoje mais de 50% do volume produzido é utilizado na produção de vigas tipo I. Atualmente o uso do LVL se expandiu a alguns países com tradição na construção de casas de madeira, tais como: Finlândia, Japão, Nova Zelândia, Austrália e Indonésia. Destacam-se a Finlândia e Austrália como países com grande desenvolvimento destes painéis, na atualidade. Os países asiáticos produzem LVL de preferência para usos não-estruturais, diferentemente dos Estados Unidos e países da Europa (PLY VISIONS, 2005).

A produção mundial anual de LVL é de aproximadamente 4,0 milhões de m³, sendo 2,7 milhões de m³ na América do Norte, 0,4 milhões de m³ na Austrália, 0,7 milhões de m³ na Ásia e 0,2 milhões de m³ na Europa. A projeção para o fim desta década é de uma produção anual de 4,7 milhões de m³ (PLY VISIONS, 2005).

O Brasil não produz LVL em escala industrial, sendo somente tema de pesquisas de alguns centros de investigações, tais como: Universidade Federal do Paraná e Universidade de São Paulo – ESALQ e, mais recentemente, a Universidade Estadual Paulista - Campus de Botucatu.

5.3 Espécies utilizadas na produção de LVL

O LVL é fabricado principalmente a partir de madeiras de coníferas, com predominância de pinus. Comparadas com as madeiras tropicais ou nativas, as coníferas oriundas de plantações são relativamente mais leves, mas cumprem com os valores de resistência mínimos requeridos para os diferentes usos destes painéis.

Hoje, com a diminuição de madeira de grandes diâmetros vinda de florestas nativas, seja por razões ecológicas (tendência mundial de valorização ambiental) ou esgotamento devido à exploração indiscriminada, as indústrias de laminados têm optado por espécies oriundas de reflorestamentos, como pinus, eucaliptos, populus, etc. Assim, na produção de LVL, uma grande variedade de espécies vindas de reflorestamentos e madeira jovem vinda de florestas nativas temperadas está sendo utilizada. Destaca-se neste sentido o trabalho de revisão bibliográfica sobre a utilização de folhosas para a produção de LVL, realizado por Ozarzka (1999). No Quadro 1 são apresentados alguns exemplos de espécies mais comuns utilizadas em pesquisas e pelas empresas na confecção de LVL.

Quadro 1 - Espécies utilizadas na produção de LVL.

Nome científico	Nome comum		Espessura das lâminas (mm)	Referência
<i>Acer rubrum</i>	Red Maple	Folhosa	4,2	Kimmel e Janowiak,1995
<i>Cryptomeria japonica</i>	Sugi	Folhosa	2,5	Sasaki e Kawai,1994
<i>Eucalyptus nitens</i>	Eucalipto	Folhosa	2,6	McKenzie et al., 2006
<i>Eucalyptus deglupta</i>	Eucalipto	Folhosa	2,5	Sasaki et al., 1993
<i>Gmelina arborea</i>	Gmelina	Folhosa	2,5	Sasaki et al., 1993
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Sweetgum	Folhosa	3,2-4,0-4,7	Hoover et al.,1987
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Yellow-	Folhosa	3,2-4,0	Hoover et al.,1987
<i>Populus spp</i>	Poplar	Folhosa	4,2 -5,0	Kimmel e Janowiak,1995
<i>Acer rubrum</i>	Poplar	Folhosa	3,2	Chui et al.,1994
<i>Eucalyptus camadulansis Dehn.</i>	Red Maple	Folhosa	3,0	Wang et al., 2003
<i>Eucalyptus grandis e E. urophylla</i>	Eucalipto	Folhosa	1,6	Aydm, et al., 2004
<i>Fagus orientalis Lipsky</i>	Beech	Folhosa	3,0	Carvalho e Machado, 2004
<i>Alstonia spp</i>	Beech	Folhosa	2,1	Aydm, et al., 2004
<i>Endospermum spp</i>	Pulai	Folhosa	2,6 e 3,6	H'ng et al., 2001
<i>Bombax spp</i>	Sesendok	Folhosa	2,6 e 3,6	H'ng et al, 2001
	Kekabu	Folhosa	2,6 e 3,6	H'ng et al, 2001
	Hutan			
<i>Acer rubrum</i>	Red Maple	Folhosa	3,2	Erickson et al. 2002
<i>Picea abies</i>	Spruce	Folhosa	3,0	CERTIFICATE, 2004
<i>Pinus elliottii</i>	Pinus	Conífera	3,2	Kretschmann et al.,1993
<i>Pinus elliottii</i>	Pinus	Conífera	2,5	Benites, 2005
<i>Pinus taeda</i>				
<i>Pinus radiata</i>	Pinus	Conífera	3,0	Harding e Orange, 1998
<i>Pinus radiata</i>	Pinus	Conífera	2,5 a 3,6	Nelson Pine Laminated Veneer Lumber LVL, 2003
<i>Pinus radiata</i>	Pinus	Conífera	3,2	The Versatile Scaffold Plank, 2004
<i>Pinus taeda</i>	Pinus	Conífera	4,2	Koch e Woodson,1968
<i>Pinus taeda</i>	Pinus	Conífera	3,2	Kretschmann et al.,1993
<i>Pseudotsuga menziessii</i>	Douglas-fir	Conífera	6,3	Bolhen,1972
			8,0	Kretschmann et al.,1993
			2,5	Norlin et al., 1999
<i>Pinus taeda L.</i>	Pinus	Conífera	3,2 e 4,2	Matos, 1997
<i>Pinus sylvestris L.</i>	Pinus	Conífera	3,0	CERTIFICATE, 2004
<i>Pinus sylvestris L.</i>	Pinus	Conífera	1,2	Çolaki et al., 2004

Normalmente nos Estados Unidos são utilizadas espécies denominadas de pinus sulistas (*Southern pine*) com densidades aparentes médias que variam de 0,48 g/cm³ a 0,59 g/cm³. Estas espécies possuem características similares em aparência e em classes de qualidade, nas quais se incluem: *Pinus taeda* (“loblolly pine” – 0,51 g/cm³), *Pinus elliottii* (“slash pine” – 0,59 g/cm³), *Pinus palustris* (“longleaf pine” – 0,59 g/cm³) e *Pinus echinata* (“shortleaf pine” – 0,51 g/cm³) (USDA, 1999).

5.4 Processo de produção do LVL

O processo de obtenção de painéis laminados a partir de lâminas de madeira coladas paralelamente é resultado de uma longa e gradual evolução de conceitos e técnicas desenvolvidas no exterior. A literatura aponta que um dos primeiros trabalhos foi realizado na década de 40, a partir de pesquisas desenvolvidas sobre produtos alternativos para a indústria de aviação, nos Estados Unidos (LUXFORD, 1944 apud SCHAFFER, 1972 e LAUFENBERG, 1983).

A partir do trabalho de Luxford (1944), surgiu uma grande quantidade de pesquisas sobre LVL, apontando principalmente a influência das características da matéria-prima (madeira), da cola e algumas características do processo de fabricação, na qualidade e nas propriedades mecânicas dos painéis. Citam-se, como desta fase, os trabalhos de Schaffer (1972), Schaffer et al. (1972), Bolhen (1972), Hoover et al. (1987), Launfenberg (1982), Launfenberg (1983), Jung (1982), Jung e Day (1981) e Kretschman et al. (1993), entre outros. Este produto começou a ser conhecido comercialmente nos Estados Unidos no final da década de 60.

Até a década de 70, a maioria dos painéis LVL era manufaturada utilizando-se a mesma tecnologia empregada na fabricação de compensados, ou seja, de forma descontínua, em prensas convencionais. Bolhen (1972) apresentou um processo de produção em alta velocidade de painéis LVL denominado “*Press-Lam*”. O grande avanço deste processo consistia na montagem das lâminas de forma aleatória antes da prensagem, o que permitia uma melhor dispersão dos nós e outros redutores de resistência, tornando o produto mais uniforme.

Ainda nesta década, os painéis LVL começaram a ser produzidos comercialmente no mundo, destacando-se o produto com o nome comercial “*Micro-Lam*”

fabricado nos Estados Unidos (KUNESH, 1978). A partir da década de 80 começa a ser empregada comercialmente a prensagem contínua de painéis LVL.

Hoje, existem basicamente dois métodos de produção de LVL que se diferenciam pelo processo de fabricação (prensagem). No primeiro método, o LVL é produzido em prensas convencionais, utilizadas comumente na manufatura de compensados de comprimento nominal de 2,40 m, e de forma descontínua. No segundo método o LVL é fabricado de forma contínua, sendo a prensagem feita em processo contínuo, sendo assim possível obter comprimentos superiores a 2,40 m.

Geralmente, na fabricação contínua é produzido um formato único de (*billet*) ou “painel”, com aproximadamente 25 m de comprimento e 1,20 m de largura. Após ser serrado longitudinalmente, obtêm-se vigas de dimensões variadas. Os processos contínuos de produção requerem investimentos altos de capital (RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980 e TAMMELA, 1998).

Nos painéis LVL produzidos com grandes comprimentos em prensa contínua, as emendas de lâminas devem ser feitas a cada 2,40 m na direção longitudinal, podendo elas ser do tipo chanfrado, de topo ou dentadas. No caso da prensagem convencional, durante a montagem do painel, deve-se cuidar para que as juntas fiquem distribuídas aleatoriamente no sentido longitudinal do painel, evitando assim a concentração de tensões. Já no caso dos painéis produzidos de forma contínua, a distribuição das emendas é mais flexível, em função do comprimento do painel, o que permite maior aleatoriedade na distribuição das emendas (AITIM, 1999; EWP, 2007).

Painéis LVL produzidos descontinuamente podem ser unidos, após sua manufatura, por emendas biseladas ou dentadas permitindo obter produtos de comprimento estrutural (USDA, 1999).

Nos processos de produção convencional de LVL que utilizam procedimentos semelhantes àqueles utilizados na manufatura de compensado, as lâminas são obtidas em torno desenrolador, são secadas, recebem a aplicação de adesivo, montadas na espessura desejada, pré-prensadas à frio e, finalmente, consolidadas em prensa quente. O processo de produção convencional possui a vantagem de poder facilmente ser implantado nas fábricas de compensados normais já instaladas, necessitando-se, para isso, de pequenas alterações em sua estrutura original (LAUFENBERG, 1983; TAMMELA, 1998).

5.4.1 Laminação, secagem, classificação e arranjo de lâminas

O laminado e a secagem das lâminas para a produção de LVL é um processo semelhante ao utilizado na produção de compensados – tornos desenroladores e secadores convencionais de lâminas. As lâminas obtidas nos tornos convencionais são em média de 2,0 a 3,2 mm de espessura, 1200 mm de largura e 1200 ou 3200 mm de comprimento. Para a grande maioria dos processos um teor de umidade das lâminas entre 4% e 6% é considerado como ideal. Altos teores de umidade geralmente resultam em uma colagem “pobre”, que pode produzir delaminação durante a prensagem quente, devido à formação de bolhas de vapor no interior do painel. Baixos teores de umidade também podem comprometer o processo pela falta de umidade das lâminas, promovida pela sobre-secagem (TOMASELLI, 1983 e RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980).

O método de fabricação do LVL estrutural permite o uso de lâminas de qualidade inferior (menor resistência) nas zonas de menor sollicitação e lâminas de melhor qualidade nas zonas de alta sollicitação (maiores esforços), aumentando assim a qualidade da matéria-prima. Na prática, na fabricação de LVL estrutural utilizam-se até cinco tipos de qualidade de lâminas na montagem. Outra forma de agregar qualidade ao produto consiste no uso da técnica da mistura de lâminas, com o objetivo de dispersar uniformemente as lâminas de menor qualidade entre as demais, lâminas que farão parte da composição do painel. Além disso, o processo permite ainda a utilização de combinações de distintas espécies, sem afetar a integridade estrutural da peça.

O uso de métodos não-destrutivos para a classificação de lâminas em classes de resistências é uma das práticas mais comuns e eficientes utilizadas na atualidade pelas empresas fabricantes de LVL. O método de classificação de lâminas por ultra-som tem sido o método mais utilizado industrialmente e em pesquisas laboratoriais.

O LVL não-estrutural pode ser produzido pela montagem aleatória das lâminas, priorizando o aspecto decorativo das lâminas da face principal na composição (AITIM, 1999).

5.4.2 Colagem e prensagem

A tecnologia básica utilizada na colagem de compensados pode ser utilizada na produção de LVL. Na produção podem-se usar vários tipos de resina, sendo as mais comuns a resina uréia-formaldeído, melamina-formaldeído e fenol-formaldeído.

A pressão, tempo e temperatura de prensagem variam de acordo com a espessura do painel, espécie de madeira, umidade das lâminas e da quantidade de cola aplicada. Segundo Raute Engineered Wood (1980), a quantidade de cola necessária é função da espécie de madeira e da qualidade da superfície da lâmina. Segundo o boletim, gramaturas normais utilizadas na fabricação de LVL são de 140 g/m² a 230 g/m², aplicadas em linha simples de colagem.

Normalmente, nas linhas de alta capacidade de produção de LVL, utilizam-se prensas de uma, duas ou três aberturas e comprimentos adequados aos formatos dos painéis LVL pré-estabelecidos. As prensas de múltiplas aberturas são mais utilizadas na produção de LVL de comprimentos específicos (de, no máximo, seis metros), tais como: vigas para tetos, pisos, treliças e estruturas de paredes. As dimensões destas prensas são, geralmente, 2,5m de largura e até 6,0m de comprimentos (RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980).

A magnitude da pressão de prensagem utilizada na fabricação de LVL depende principalmente da espécie de madeira. Assim, para madeira leve (densidade aparente menor que 0,50 g/cm³) colada com resina uréica, a pressão recomendada é de 12 kgf/cm² a 16 kgf/cm² e com resina fenólica de 14 kgf/cm². A pressão recomendada para LVL produzido com lâminas de madeiras duras é maior em 2 kgf/cm² com relação à resina anterior (RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980).

Segundo Tammela (1998) e CWC (2007), as temperaturas de prensagem recomendadas para a produção de LVL são de 110°C para as resinas uréicas e de 135°C para as fenólicas.

O tempo de prensagem depende da espessura do painel, espécie de madeira e tipo de cola.

5.5 Vantagens dos painéis LVL

Um dos principais motivos do crescimento da utilização do LVL é a escassez de toras de grandes diâmetros, necessários à produção de elementos estruturais de grandes dimensões, tais como vigas. Tendo em vista as dificuldades cada vez maiores na obtenção de matéria-prima para produção de madeira serrada e laminados, extraída de espécies tradicionais provenientes de florestas nativas, surgiu a necessidade de desenvolver produtos à base de madeira proveniente de reflorestamentos, utilizando-se de novos conceitos tecnológicos de combinação e reestruturação de elementos de madeira para se obter produtos funcionais e de alto grau de desempenho (produtos engenheirados), que, a sua vez, têm seus valores de rigidez e resistência pré-estabelecidos.

De acordo com Pease (1994 apud Matos, 1997), os painéis LVL, quando comparados com madeira sólida, apresentam as seguintes vantagens:

a) Maior resistência – a estrutura laminada dos painéis torna-os mais resistentes e estáveis. O processo de classificação das lâminas e a distribuição dos defeitos através das lâminas conferem propriedades de resistência que podem ser calculadas com precisão. Assim, o nível de resistência do LVL é maior e o desvio padrão da distribuição do módulo de ruptura (MOR) é menor, quando comparado à madeira laminada colada (*glulam*) (YOUNGQUIST et al., 1978; SPELTER, 1997).

b) Flexibilidade dimensional – os painéis LVL podem ser produzidos em qualquer largura e comprimento especificado, sem limitações da linha de produção.

c) Utilização de grande variedade de espécies e tamanhos das toras – para a produção de painéis de lâminas paralelas, normalmente são utilizadas espécies de coníferas, com predominância para os pinus.

5.6 Propriedades físicas e mecânicas dos LVL

Após a produção dos primeiros LVL, iniciou-se uma série de investigações científicas visando o ajuste das variáveis do processo e sua influência sobre as características físicas e mecânicas dos painéis. Assim, destacam-se os trabalhos de Youngquist et al. (1978) com painéis LVL confeccionados com Douglas-fir, Bohlen (1972) com LVL de

Douglas-fir; Laufenberg (1983), Kretschman et al. (1993) com LVL de pinus sulistas e Jung (1982) com Douglas-fir.

Hoje, com o aumento da produção e o interesse pelos painéis LVL, têm-se disponibilizado algumas normas e documentos técnicos para caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos painéis LVL, tais como o da Associação de Madeira Engenheirada - APA EWS PRL-501, nos Estados Unidos (ENGINEERED WOOD SYSTEMS, 2000). No documento são apresentados valores de cálculo de diferentes classes de painéis, bem como valores característicos das resistências, obtidos com o ensaio de corpos-de-prova (Quadro 2).

Quadro 2 – Valores característicos de ensaios para o desempenho de painéis LVL previamente classificados pela APA EWS ^(a)

APA EWS Classes de resistência do LVL	E ^(b) MPa	f _b ^(c) MPa	f _t ^(d) MPa	f _c ^(e) MPa	f _v ^(f) Edgewise MPa	f _{c⊥} ^(g) Edgewise MPa
1.5E-2250F	10342	32,58	21,72	25,54	4,79	6,62
1.8E-2600F	12411	37,65	24,61	31,44	6,20	8,07
1.9E-2600F	13100	37,65	24,61	33,41	6,20	8,07
2.0E-2900F	13790	41,99	27,51	36,03	6,20	8,65
2.1E-3100F	14479	44,89	31,85	39,30	6,20	9,79

(a) Os valores tabulados são valores característicos de ensaios;

(b) Módulo de elasticidade à flexão, utilizável tanto em aplicações *edgewise*, como *flatwise*;

(c) Resistência à flexão (f_b) é aplicável tanto em aplicações *edgewise* como *flatwise*. Para alturas de 3-1/2 polegadas ou maiores, quando a flexão é *edgewise*, o valor f_b tabulado deve ser modificado por (12/d)^{1/8}, onde d é a altura da viga, em polegadas. Para alturas menores que 3-1/2 polegadas quando a flexão é *edgewise*, usar o f_b ajustado para 3,5 polegadas. Nenhum ajuste de f_b é requerido para aplicações *flatwise*;

(d) Resistência à tração paralela (f_t) do LVL é baseado em comprimentos de referência de 4 pés. Para corpos-de-prova maiores que 4 pés, o valor tabulado de f_t deve ser ajustado por (4/L)^{1/8}, onde L é o comprimento atual, em pés.

• 1psi = 6,895x10⁻³ MPa

(e) Compressão paralela à grã (f_c) do LVL;

(f) Tensão ao cisalhamento (f_v) do LVL quando o carregamento é *edgewise*;

(g) Resistência à compressão perpendicular à grã (f_{c⊥}) do LVL quando o carregamento é *edgewise*.

Para o presente trabalho, os valores utilizados de f_b para os ensaios de flexão na condição de maior inércia (*edgewise*), cuja altura utilizada foi superior a 3,5", são, respectivamente: 5,431; 6,276; 6,276; 7,000; 7,483 psi.

Fonte: PRL-501 (EWS, 2000), modificado pelo autor

Segundo Green e Hernandez (1998), nos Estados Unidos a maioria dos fabricantes de LVL analisam as propriedades físicas e mecânicas do LVL com base no preconizado na Norma ASTM D5456 (ASTM, 1996). Atualmente, valores de cálculo não têm sido estabelecidos de forma unificada para estes produtos nos Estados Unidos e no mundo. Cada fabricante tem seu próprio padrão, com os valores técnicos indicados nos seus folhetos comerciais. Por isso, muitos produtores nos Estados Unidos confeccionam estes painéis de tal forma que as propriedades sejam, no mínimo, superiores aos valores padronizados da madeira serrada dimensionada originária (Quadro 3).

Quadro 3 - Valores da resistência de cálculo e rigidez para produtos de madeira estrutural.

Produto	E _d MPa	F _b MPa	F _t MPa	F _c MPa	F _v MPa	F _{cper} MPa
<i>Compostos estruturais de madeira</i>						
LVL	13790	23,80	12,45	18,79	1,96	5,17
PSL	13790	22,99	16,55	20,00	1,45	3,62
LSL	10342	17,37	10,89	13,44	2,76	5,34
<i>Madeira serrada:</i>						
Classe ss	12411	19,65	11,03	14,48	0,62	3,90
Classe N.2	11032	10,34	5,69	11,38	0,62	3,90
MSR	13790	16,55	13,44	13,62	0,62	3,90
MSR	10342	11,38	7,03	11,72	0,62	3,90

Valores para madeira serrada 2''x 4'' de pinus da Região Sul (*Southern pine*)

Ed: módulo de elasticidade em flexão; F_b: tensão admissível à flexão; F_t: tensão admissível à tração paralela; F_c: tensão admissível à compressão paralela grã; F_v: tensão admissível ao cisalhamento horizontal; F_{cper}: tensão admissível ao cisalhamento perpendicular à grã.

Fonte: Green e Hernandez (1998), modificado pelo autor.

No Brasil, para efeito de comparação das propriedades mecânicas, pode-se comparar os valores obtidos dos painéis LVL produzidos aos valores médios da madeira serrada de coníferas tropicais apresentados no Quadro 4 pela NBR7190, (ABNT, 1997).

Quadro 4 – Valores médios da densidade e das propriedades mecânicas de madeira de coníferas.

Nome comum (coníferas)	Nome científico	$\rho_{ap\ 12\%}$ (kg/m ³)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	f_v (MPa)	$E_{c,0}$ (MPa)	n
Pinho do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15225	15
Pinus caribea	<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431	28
Pinus bahamensis	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110	32
Pinus hondurensis	<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868	99
Pinus elliotti	<i>Pinus elliotti</i> var. <i>elliotti</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889	21
Pinus oocarpa	<i>Pinus oocarpa</i> Shield	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10904	71
Pinus taeda	<i>Pinus taeda</i> L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	15

$\rho_{ap\ 12\%}$: massa específica aparente a 12% de umidade; $f_{c,0}$: é a resistência à compressão paralela às fibras; $f_{t,0}$: é a resistência à tração paralela às fibras; $f_{t,90}$: é a resistência à tração normal às fibras; f_v : é a resistência ao cisalhamento; $E_{c,0}$: é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras; n: é o número de corpos-de-prova ensaiados.

Nota:

- 1) Coeficiente de variação para resistência a solicitações normais $\delta= 18\%$
- 2) Coeficiente de variação para resistência a solicitações tangenciais $\delta= 28\%$

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

5.7 Técnicas de avaliação não-destrutiva de propriedades de madeira

As pesquisas pioneiras sobre a aplicabilidade de ensaios não-destrutivos na inferência de propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 50, nos Estados Unidos.

Os ensaios não-destrutivos apresentam como principais vantagens em relação aos ensaios destrutivos convencionais e a rapidez e praticidade dos testes, que podem ser aplicados tanto na árvore “em pé”, quanto em postes, madeira serrada ou mesmo corpos-de-prova de diferentes geometrias e tamanhos.

A calibração dos resultados indiretos obtidos - normalmente velocidades de propagação das ondas ou frequências de vibração, nos casos mais simples –

aliada à busca da extrapolação das práticas laboratoriais para as situações reais, em linhas de produção nas indústrias, têm sido a tônica da pesquisas desenvolvidas pelos principais centros de estudo.

Embora os Estados Unidos ainda detenham a primazia no desenvolvimento de conhecimentos em ensaios não-destrutivos, países como França, Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, já têm figurado com notoriedade nesse cenário.

As hipóteses fundamentais para ensaios não-destrutivos em madeira foram estabelecidas por Jayne (1959). Em seu trabalho, ele propôs que as propriedades de conservação e dissipação de energia da madeira, que podem ser mensuradas por métodos de ensaios não-destrutivos, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático estrutural do material. Conseqüentemente, podem ser estabelecidas relações matemáticas entre essas propriedades (conservação e dissipação de energia) e a resistência e elasticidade da madeira.

Os principais métodos não-destrutivos estudados pelo CEVEMAD – Centro Virtual de Pesquisas em Madeiras da FCA - Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Botucatu são avaliações de dureza com uso de máquinas de ensaio e de equipamentos portáteis, o método das ondas de tensão, o método do ultra-som e o método da vibração transversal.

No caso específico de painéis à base de madeira na literatura internacional destaca-se o uso dos dois primeiros métodos citados, para os quais é apresentado, a seguir, breve histórico, com ênfase para os trabalhos desenvolvidos no Centro Virtual.

5.7.1 Método das ondas de tensão

No método das ondas de tensão, internacionalmente referido como “*stress wave method*”, uma onda é induzida numa das extremidades ou face do material, através de um impacto. Essa onda se propaga pelo material, sendo as características principais dessa transmissão a velocidade e a atenuação, parâmetros intrínsecos do meio.

O método de ensaio fundamenta-se, de forma simplificada, na teoria de propagação unidimensional das ondas para uma barra homogênea e elástica.

Hearmon (1966) desenvolveu o equacionamento teórico da propagação da onda na vibração longitudinal. Resumidamente, pode-se expressar o módulo de elasticidade dinâmico E_d como:

$$E_d = v^2 \cdot \rho_{apar} \quad (1)$$

onde:

E_d - módulo de elasticidade dinâmico;

v - velocidade de propagação da onda de tensão;

ρ_{apar} - densidade (aparente) do material.

Embora todo esse equacionamento tenha sido embasado na teoria de propagação de ondas unidirecionais em meio homogêneo e elástico, e facilmente se constate que a madeira não é um material homogêneo nem tampouco isotrópico, diversos pesquisadores têm encontrado bons resultados com uso dessa teoria simplificada (KAISERLIK; PELLERIN, 1977, GERHARDS, 1981, 1982, ROSS, 1985, ROSS; PELLERIN, 1994).

No âmbito nacional, a UFPR – Universidade Federal do Paraná realiza, desde a década de 1990, trabalhos de pesquisa com uso do método das ondas de tensão na avaliação da qualidade de madeira para alguns usos específicos.

O trabalho de Gabriel e Ballarin (2000) detalha o equacionamento geral do fenômeno de propagação de ondas unidirecionais na madeira e apresenta correlações entre os resultados desses ensaios não-destrutivos e os ensaios destrutivos convencionais de flexão. Resumidamente, o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) é igual ao produto da densidade do material (aparente ou, eventualmente, básica) pelo quadrado da velocidade de propagação da onda no material.

Rocha (2003) estudou a viabilidade de emprego de ensaios não-destrutivos (ondas de tensão e ultra-som) na caracterização elástica e da resistência de algumas amostras de madeiras para dormentes. Concluiu que os dois métodos apresentaram

sensibilidade para as duas finalidades, com leve superioridade nos coeficientes de determinação das regressões lineares (velocidade das ondas – módulo de elasticidade de corpos-de-prova) dos ensaios pelo método das ondas de tensão. Por outro lado, o método das ondas de ultra-som mostrou-se mais prático e vantajoso para operação em condições de campo.

Hellmeister (2003) estimou a correlação existente entre o módulo de elasticidade da tora originária e os módulos de elasticidade (à compressão paralela e flexão) determinados em corpos-de-prova representativos das pranchas e tábuas originadas do desdobro da tora.

O autor apresenta uma extensa revisão bibliográfica dos trabalhos internacionais, com sumário das pesquisas da correlação entre o módulo de elasticidade obtido em função da velocidade de propagação das ondas de tensão e em ensaios estáticos convencionais. Dá ênfase especial aos trabalhos mais recentes de Wang et al. (2000, 2001, 2002). Concluiu, em seu trabalho, que o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) obtido pelo ensaio não-destrutivo das ondas de tensão em toras apresenta correlação linear (R^2 variando de 0,53 a 0,60) com o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova representativos dessa madeira. Evidenciou, ainda, a diferenciação estatística das velocidades de propagação das ondas de tensão nos lenhos adulto (velocidade superior), juvenil (velocidade intermediária) e na medula (velocidade inferior), com espectro máximo de variação de 10,4%.

5.7.2 Método do ultra-som

Os aspectos aqui tratados são uma compilação dos diversos capítulos de Bucur (1995) e outros pesquisadores da área da acústica da madeira feita por Nogueira (2003).

As ondas acústicas de frequência superior a 20.000 Hz são convencionalmente chamadas de ondas de ultra-som.

O método ultrassonoro se apóia na análise de propagação de uma onda e sua relação com as constantes elásticas da madeira. Considerando que a madeira possui três

eixos de simetria elástica ortogonais entre si (longitudinal, radial e tangencial) é considerada simplificada como um material ortotrópico linear.

Nos sólidos ortotrópicos as constantes elásticas são influenciadas mutuamente pelos três planos de simetria, tornando a análise mais complexa. A matriz de rigidez para estes materiais é simétrica e contém nove constantes independentes: seis termos diagonais (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} e C_{66}) e três termos não-diagonais (C_{12} , C_{13} e C_{23}).

A determinação destes termos pode ser realizada por meio da propagação de ondas de volume nos materiais. A teoria que envolve a determinação das equações que correlacionam a propagação da onda aos termos da matriz de rigidez, expressa na equação de Christoffel, foi apresentada por Dieulesaint e Royer (1974), entre outros.

A forma geral para a determinação dos seis termos da diagonal da matriz de rigidez é:

$$C_{ii} = v_{ii}^2 \cdot \rho \quad (2)$$

onde

i - direção L ou R ou T

v - velocidade de propagação da onda no material na direção considerada

ρ - densidade do material

Para o cálculo dos termos não-diagonais da matriz de rigidez, a propagação da onda deve se dar fora dos eixos principais de simetria. O cálculo dos termos não-diagonais requer, portanto, valores de velocidade obtidos para as ondas quase longitudinais e quase transversais.

Para todos os tipos de materiais é possível correlacionar os termos da matriz de rigidez com os módulos de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) e com os coeficientes de Poisson (ν). Por outro lado, os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson podem ser relacionados à velocidade de propagação da onda no material. A complexidade das expressões que correlacionam estes parâmetros depende dos aspectos de simetria dos materiais.

Segundo Bucur (1995), em peças com comprimento longitudinal muitas vezes superior às dimensões de sua seção transversal, negligenciam-se os efeitos dos coeficientes de Poisson (ν), chegando-se a:

$$C_{LL} \approx E_L \quad (3)$$

Em muitas situações o módulo de elasticidade assim obtido é referido como E_d — módulo de elasticidade dinâmico — em contraposição ao módulo de elasticidade obtido em ensaios convencionais de flexão (E_M).

Conforme apresentado por Rocha (2003), vários pesquisadores, como Bucur (1984), Sandoz (1990), Herzig (1992), Koubaa et al. (1997), dentre outros comprovaram a eficiência do método do ultra-som para determinar as constantes elásticas da madeira.

No Brasil cabe destaque aos trabalhos de Bartholomeu et al. (1998), Gonçalves & Bartholomeu (2000), Bartholomeu (2001) e Nogueira & Ballarin (2002, 2003)

Bartholomeu et.al (1998) estudaram as correlações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos à compressão paralela às fibras em corpos-de-prova das madeiras de Angico preto (*Anadenanthera macrocarpa*), Peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*) e *Pinus elliottii* na condição de equilíbrio ao ar, utilizando um equipamento de ultra-som de 1 MHz de frequência.

Gonçalves e Bartholomeu (2000) estudaram as correlações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e à flexão estática por 4 pontos em vigas de dimensões estruturais na condição saturada de Eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) e *Pinus elliottii*, com uso de um equipamento de ultra-som com transdutores de 45 kHz.

Os resultados obtidos por Nogueira e Ballarin (2003) mostraram a sensibilidade do método na avaliação do módulo de elasticidade estático da madeira de *P. taeda* L. nos eixos de simetria longitudinal (coeficiente de determinação das regressões lineares - $R^2 \approx 97\%$) e radial ($R^2 \approx 82\%$) da madeira. Na direção tangencial, o coeficiente de determinação da regressão linear foi relativamente inferior ($R^2 \approx 42\%$), não indicando sensibilidade do método do ultra-som na avaliação do módulo de elasticidade estático nessa direção.

A utilização do ultra-som na avaliação de defeitos e na avaliação da degradação biológica da madeira, utilizando equipamentos portáteis, pode ter grande aplicação prática do ponto de vista industrial (BUCUR, 1995, ROSS et al. 2000, PUCCINI, 2002).

Conforme comentado por Rocha (2003), Waubke (1981) e Sandoz (1990) apresentaram propostas de classificação de peças estruturais de madeira utilizando o ultra-som. Essa classificação é baseada, principalmente, em correlações existentes entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som na madeira e parâmetros de resistência e rigidez do material. Posteriormente, através dessas correlações os autores propuseram faixas de velocidades relacionadas às classes que representam diferentes expectativas de resistência e elasticidade da madeira.

Os trabalhos mais recentes no Brasil reportam-se a essa temática, de classificação de peças de dimensões comerciais com ultra-som.

Bartholomeu e Gonçalves (2006) propuseram uma tabela de classificação para madeira de dicotiledôneas, que está apresentada no âmbito da Comissão de Estudos CE 58:000.10 ABNT/ONS-58.

Mais recentemente, Nogueira (2007) mostrou que a classificação de peças de madeira serrada de eucalipto em classes de resistência pode ser conduzida através de ensaios não-destrutivos, tanto na condição verde como na condição de equilíbrio ao ar. As avaliações da velocidade de propagação da onda de ultra-som e da velocidade das ondas de tensão na condição de equilíbrio ao ar permitiram o enquadramento das peças em classes de resistência que atenderiam o conceito de resistência característica, de no máximo 5% das peças com resistência inferior ao valor estipulado. Contudo, o estudo evidenciou, também, que as faixas de velocidade de propagação das ondas (tanto de ultra-som como de ondas de tensão) parecem aplicáveis somente ao universo amostral do estudo, sendo impossível garantir a extensão das faixas de velocidade nele estabelecidas para outros universos amostrais.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Espécies estudadas

A madeira utilizada neste estudo foi proveniente de plantios de pinus tropicais (*P. caribae* var. *caribae*, *P. caribae* var. *bahamensis*, *P. caribae* var. *hondurensis* e *P. oocarpa*), da região de São Paulo. As lâminas obtidas dessa madeira foram fornecidas pela Indústria de Compensados Caribea S.A, São Manuel, SP.

6.2 Ensaios preliminares

Buscando uma definição correta de algumas variáveis do processo de produção e avaliação dos painéis LVL, foram realizados diversos ensaios preliminares com os seguintes objetivos:

- a) verificação da variação do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método das ondas de tensão em lâminas de madeira de pinus de 600 mm x 600 mm;
- b) análise do tempo e temperatura de prensagem de painéis LVL de 600 mm x 600 mm confeccionados em laboratório;
- c) análise do tempo e temperatura de prensagem de painéis LVL de dimensões comerciais na indústria;

6.2.1 Variação do módulo de elasticidade dinâmico em lâminas

Essa avaliação teve como objetivo a verificação da correlação e da igualdade estatística existente entre o módulo de elasticidade dinâmico, inferido com o emprego do método não-destrutivo de ondas de tensão, na faixa central e nas bordas da lâmina. Para esta avaliação foi utilizado o aparelho de “*Stress Wave Timer*” modelo 239 A da Metriguard, pertencente ao Laboratório de Ensaio de Materiais da FCA - Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

Foram analisadas 510 lâminas de pinus tropicais, com dimensões nominais médias de 600 mm x 600 mm x 3 mm.

Nas lâminas estudadas foram demarcadas 3 faixas, com 200 mm de largura cada uma, e em cada uma dessas faixas foi realizado o ensaio de ondas de tensão com três repetições, Figura 1.

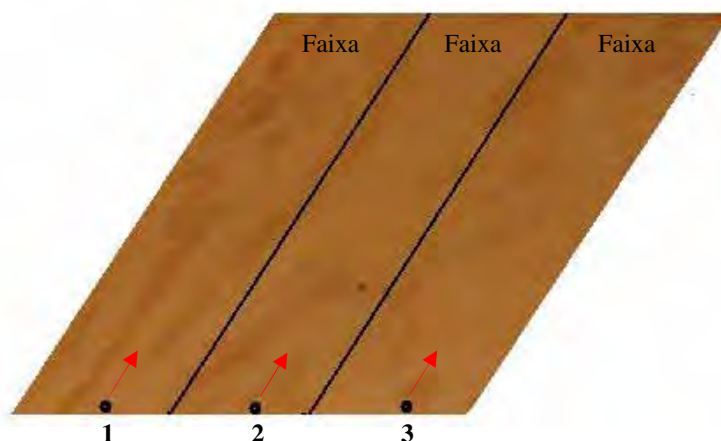


Figura 1 - Ensaio preliminar - Medição do módulo de elasticidade nas lâminas. 1, 2 e 3 são regiões (faixas) de avaliação do módulo de elasticidade dinâmico em lâminas.

6.2.2 Tempo e temperatura de prensagem dos painéis LVL

Essa avaliação teve como objetivo analisar o tempo de prensagem e o comportamento do fluxo de calor (temperatura) através da espessura do painel, até a linha de

cola mais interna, para estimar o tempo de cura ou endurecimento real do adesivo, em escala laboratorial e industrial.

O ensaio em escala laboratorial foi realizado no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da FCA - Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP.

Foram confeccionados 3 painéis LVL, a partir de lâminas de pinus tropicais de 3 mm de espessura nominal fornecidas pela Indústria Caribe S.A.: um painel com 9 lâminas, com dimensões nominais de 600 mm x 600 mm x 27 mm e dois painéis com 17 lâminas, com dimensões nominais de 600 mm x 600 mm x 51 mm.

Os painéis foram montados utilizando-se a técnica da mistura de lâminas, ou seja, com lâminas selecionadas aleatoriamente.

O adesivo utilizado foi à base de fenol-formaldeído sob o nome comercial de Cascophen HL-2080, da BORDEN S.A., aplicado na razão de 360 gramas por metro quadrado de linha dupla de colagem. O teor de umidade das lâminas utilizadas neste ensaio, avaliado com o medidor de umidade para madeira de pequena espessura TCS-91-Sultech Sistemas Eletrônicos Ltda., foi em torno de 6 a 9% de umidade.

Por recomendação da empresa, foi medida a viscosidade da cola, com o auxílio de um Viscosímetro tipo Copo Ford, seguindo-se as orientações do fabricante, segundo o qual o fluxo deve se interromper dentro do intervalo de 38 a 45 segundos, para esse tipo de cola. A viscosidade foi de 40 segundos.

Para a medição das temperaturas através da espessura do painel, antes da prensagem foram instalados termopares do tipo T – cobre-constantan - em diferentes linhas de cola, nos 3 painéis produzidos, como mostrado no Quadro 5 e na Figura 2. Todos os termopares foram localizados no ponto central das lâminas e foram ligados a um sistema de aquisição de dados Micrologger, da Campbell Scientific Inc., para registro do tempo e da temperatura.

Finalmente os painéis foram consolidados em uma prensa hidráulica de laboratório de marca OMECO, com um pistão, abertura simples, aquecimento elétrico dos pratos, dotada de controle de temperatura e pressão. Na prensagem à quente foi utilizada uma pressão específica de 10 kgf/cm² e uma temperatura de prensagem de 135°C.

Para cada uma das situações estudadas foi avaliado o tempo necessário para que a temperatura na linha de cola mais interna do painel atingisse 130°C, segundo recomendações do fabricante do adesivo.

Para estimar o tempo de prensagem para a obtenção da resistência máxima da colagem efetuada com a resina fenólica Cascophen HL-2080 da BORDEN S.A., para uma temperatura da prensa de 130°C, foi utilizada a seguinte relação recomendada pelo fabricante:

$$T = T_b + T_{mm} \quad (4)$$

T - tempo total de prensagem (min);

T_b - tempo base = 2,00 min;

T_{mm} - tempo a mais para cada milímetro até a linha mais profunda de colagem

Assim,

$$T_{mm} = 2.e.n \quad (5)$$

onde:

e - espessura da lâmina (mm);

n - número de lâminas de uma face até a linha mais profunda de colagem do painel.

Considerando-se uma espessura real das lâminas de 2,8 mm, o painel LVL-9 ter-se-ia um tempo de prensagem de 30 minutos, e os painéis LVL-17A e LVL-17B ter-se-iam um tempo de 52,4 minutos (Quadro 6).

Quadro 6– Tempos de prensagem dos painéis LVL laboratoriais e comerciais

Painéis LVL tamanho laboratorial (60x60 cm)			
Tratamentos	Espessura média real das lâminas (mm)	Tempo recomendado ⁽¹⁾ (min)	Obtido pelo gráfico ⁽²⁾ (min)
LVL-9	2,8	30,0	30,0
LVL-17A	2,8	52,4	56,0
LVL-17B	2,8	52,4	53,0
Painéis LVL tamanho comercial			
Tratamentos	Espessura média real das lâminas (mm)	Tempo recomendado (min)	Tempo do gráfico de temperatura (min)
LVL-15	2,2	34,5	32,0
LVL-25A	2,2	56,5	55,0
LVL-25B	2,2	56,5	55,0

Notas:

(1) a partir de relações empíricas sugeridas pelo fabricante da resina.

(2) tempo necessário para se atingir a temperatura de 120°C na linha de cola mais profunda.

Os ensaios em escala comercial foram realizados na Indústria de Compensados Caribea S.A., em São Manuel, SP.

Foram confeccionados 3 painéis LVL, montados aleatoriamente a partir de lâminas de pinus tropicais de 2,2 mm de espessura nominal, escolhidas aleatoriamente da produção da própria indústria. Foi fabricado um painel de 15 lâminas, com dimensões nominais de 2440 mm x 1220 mm x 33 mm, e dois painéis com 25 lâminas, com dimensões nominais de 2440 mm x 1220 mm x 55 mm.

As variáveis do processo de fabricação dos painéis comerciais (umidade das lâminas, tipo e aplicação de cola, pré-prensagem à frio, pressão e temperatura de prensagem) foram escolhidas levando-se em consideração a experiência operacional da indústria. Assim, a umidade média das lâminas foi de 5%, o adesivo utilizado foi à base de fenol-formaldeído sob o nome comercial de CR-7010, da SCHENECTADY CRIOS S.A., aplicado na razão de 380 gramas por metro quadrado de linha dupla de madeira, o tempo de pré-prensagem foi de 30 minutos e a pressão específica e a temperatura de prensagem foram de 10 kgf/cm² e 135°C, respectivamente. O tempo de prensagem foi monitorado seguindo-se a experiência da indústria e os resultados dos ensaios laboratoriais.

Para estimar o tempo de prensagem para a obtenção da resistência máxima da colagem nos painéis LVL fabricados com dimensões comerciais e colados com resina à base de fenol-formaldeído sob o nome comercial de CR-7010, da SCHENECTADY CRIOS S.A., foi utilizada a seguinte relação recomendada pelo fabricante:

$$T = T_b + T_{ap} \quad (6)$$

onde:

T - tempo total de prensagem (min);

T_b - tempo base = 2,5 a 1,50 min (para temperatura nos pratos de 125°C a 140°C);

T_{ep} - tempo a mais de 1 minuto para cada milímetro de espessura do painel.

Considerando-se uma espessura real das lâminas de 2,2 mm, um tempo base de 1,5 minutos e uma temperatura de prensagem de 135°C, o painel LVL 15 ter-se-ia um tempo de prensagem de 34,5 min, e os painéis LVL 25-A e LVL 25-B ter-se-iam um tempo de prensagem de 56,5 min (Quadro 6).

Para a medição do tempo e o fluxo de calor (temperatura) através da espessura dos painéis, foram também instalados termopares do tipo T – cobre-constantan em diferentes linhas de colas, como mostrado no Quadro 5 e na Figura 3.



Figura 3 - Instalação dos termopares no painel comercial. a) e b) instalação no interior das lâminas antes da entrada na prensa; c) prensagem do painel e d) vista geral do Micrologger.

6.3 Fabricação de painéis LVL para o estudo

Neste trabalho foram fabricados painéis LVL de dimensões comerciais na Indústria de Compensados Caribe S.A. em São Manuel, SP. Os painéis foram produzidos na mesma linha de produção de compensados da empresa no geral, com utilização das mesmas variáveis do processo convencional da empresa.

A madeira utilizada foram lâminas de pinus tropicais com 2,2 mm de espessura nominal, provenientes de plantios de diferentes regiões de São Paulo, obtidas pelo processo de desenrolamento da tora em torno desfolhador, secadas a um teor de umidade de aproximadamente 4% e classificadas visualmente para a produção de compensados.

6.3.1 Classificação de lâminas secas

As lâminas secas foram classificadas através de dois métodos:

a) Método visual - realizado pela indústria com base no tipo, quantidade e dimensões dos defeitos apresentados nas lâminas, atribuídos através da inspeção visual, conforme estabelecido pelo Programa Nacional de Qualidade da Madeira – Compensados de Pinus (ABIMCI, 2002). Segundo este programa, a classificação das lâminas é feita em classes de qualidade decrescentes (A, B, C+, C e D). Neste estudo as lâminas foram fornecidas pela indústria, já classificadas e secas nas qualidades A, B e C+ (Figura 4). Estas lâminas são de boa qualidade visual, com incidência de nós muito pequenos, e utilizadas preferencialmente, para a face e contra-face em compensados de pinus.

b) Método não-destrutivo - as lâminas secas e selecionadas visualmente foram classificadas segundo o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) pelo método de aplicação de ondas de tensão, com uso do *Stress Wave Timer*, modelo Metriguard 238A, e também através da constante dinâmica C_{LL} , determinada por ensaios de ultra-som com o uso do equipamento de marca *Steinkamp* modelo BP-7, de fabricação alemã e transdutores piezolétricos de faces planas e frequência de 45 kHz, como ilustrado na Figura 5.

A partir da obtenção dos valores individuais do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e da constante dinâmica (C_{LL}) para as lâminas, elas foram classificadas em dois grupos: baixo e alto módulo de elasticidade. As faixas de valores de cada grupo foram determinadas estatisticamente a partir da função densidade de probabilidade.

Após as lâminas classificadas nestes dois grupos, foram montados os painéis LVL de acordo a quatro tratamentos pré-estabelecidos e descritos nos itens seguintes.



Figura 4 – Qualidade das lâminas para painéis LVL.



Figura 5 - Ensaio não-destrutivo nas lâminas; a) ondas de tensão - *Stress Wave Timer*; b, c e d) equipamento de ultra-som *Steinkamp modelo BP-7* e ensaios de ultra-som.

6.3.2 Produção e montagem dos painéis LVL

Para este estudo foram fabricados dois tipos de painéis LVL, de 13 e 25 lâminas, com dimensões nominais de 2440 mm x 1220 mm x 28 mm e 2440 mm x 1220 mm x 55 mm, respectivamente.

A umidade média das lâminas foi de 5%, o adesivo utilizado foi à base de fenol-formaldeído sob o nome comercial de CR-7010 da SCHENECTADY CRIOS S.A., aplicado na razão de 380 gramas por metro quadrado de superfície dupla de madeira, o tempo de pré-prensagem foi de 30 minutos e a pressão específica e a temperatura de prensagem foram de 10 kgf/cm² e 135°C, respectivamente. O tempo de prensagem foi monitorado seguindo-se a experiência da indústria e os resultados dos ensaios laboratoriais preliminares.

Após a prensagem, os painéis foram mantidos durante 30 dias empilhados e distanciados entre si, com uso de separadores em local coberto, para climatização em temperatura ambiente.

Os painéis LVL foram fabricados atendendo a quatro tratamentos, para os dois tipos de painéis:

- T1-LVL homogêneo 1 (produzido somente com lâminas classificadas com alto módulo de elasticidade dinâmico).
- T2-LVL homogêneo 2 (produzido somente com lâminas classificadas com baixo módulo de elasticidade dinâmico).
- T3-LVL com lâminas combinadas (lâminas de alto módulo de elasticidade dinâmico na face e contra-face e baixo módulo de elasticidade dinâmico no miolo).
 - A composição dos painéis de 13 lâminas foi de 6 lâminas de alto módulo de elasticidade na face e contra-face (3 em cada lado do painel) e 7 lâminas de baixo módulo de elasticidade no miolo.
 - A composição dos painéis de 25 lâminas foi de 12 lâminas de alto módulo de elasticidade na face e contra-face (6 em cada lado do painel) e 13 lâminas de baixo módulo de elasticidade no miolo.
- T4-LVL com lâminas alternadas (1 com alto módulo de elasticidade e outra com baixo módulo, alternadamente).

Para cada tratamento foram feitas três repetições, perfazendo um total de 24 painéis LVL (12 painéis com 13 lâminas e 12 com 25 lâminas).

A Figura 6 apresenta a seqüência de etapas da fabricação dos painéis LVL.



Figura 6 – Fabricação de painéis LVL. a) aplicação de cola nas lâminas; b) montagem das lâminas; c) pré-prensagem à frio; d) entrada dos painéis à prensa quente; e) prensagem à quente, e f) saída dos painéis da prensa.

6.4 Ensaios não-destrutivos dos painéis LVL

Através de ensaios não-destrutivos de emissão de ondas de tensão e ultra-som, foram calculadas as propriedades dinâmicas (E_d e C_{LL}) na direção longitudinal e transversal dos painéis LVL, com o intuito de buscar uma gama maior de parâmetros de avaliação dos painéis e correlação entre os resultados dos ensaios não-destrutivos e destrutivos.

Nesses ensaios foram realizadas três medições em dois pontos distintos na direção longitudinal e em dois pontos distintos na direção transversal, para os dois métodos (ondas de tensão e ultra-som), abrangendo assim uma avaliação completa do painel. Também foi avaliado o empenamento dos painéis através da medição da flecha nas extremidades.

6.5 Ensaios em corpos-de-prova dos painéis

A avaliação do desempenho dos painéis LVL foi conduzida com ensaios físicos e mecânicos em corpos-de-prova deles confeccionados, atendendo-se no geral às prescrições das normas indicadas nas Quadros 7 e 8.

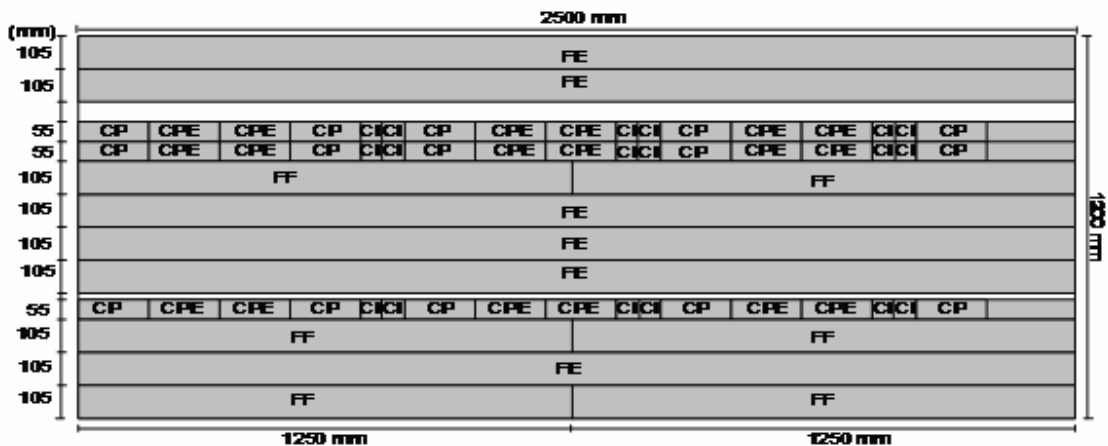
Foram produzidos 6 corpos-de-prova para cada painel e para cada ensaio, como indicado no esquema das Figuras 7 e 8.

Quadro 7 – Ensaio e normas – painéis LVL de 25 lâminas.

Ensaio	Propriedades	Normas
Flexão paralela às fibras	a) Corpos-de-prova: $E_{s,f}$ $E_{s,e}$ C_{LL} (ultra-som) E_d (ondas de tensão) $f_{M,f}$ $f_{M,e}$ b) Painel LVL E_d (ultra-som) E_d (ondas de tensão)	Especif. Norma ASTM-D 5456 e métodos ASTM-D 198 e ASTM-D 4761
Módulos de elasticidade dinâmicos (longitudinal e transversal) no painel e em c.p.	E_d (ultra-som) E_d (ondas de tensão)	
Compressão paralela às fibras	$f_{c,0}$ (corpos-de-prova)	Especif. Norma ASTM-D 5456 e métodos ASTM-D 198 e ASTM-D 4761
Compressão perpendicular às fibras	Carga na deformação de 2,5 mm (corpos-de-prova)	Especif. Norma ASTM-D 5456 e método ASTM-D 143
Cisalhamento longitudinal no plano L-X	f_v - resistência ao cisalhamento (corpos-de-prova)	Especif. Norma ASTM-D 5456 e método ASTM-D 143
Densidade	Densidade aparente (corpos-de-prova)	Especif. Norma ASTM-D 5456 e método ASTM-D 2395
Umidade	Teor de umidade (corpos-de-prova)	Especif. Norma ASTM-D 5456 e método ASTM-D 4442
$E_{s,f}$ - módulo de elasticidade à flexão, posição <i>flatwise</i> (ensaio em relação ao eixo de menor inércia do c.p.); $E_{s,e}$ - módulo de elasticidade à flexão, posição <i>edgewise</i> (ensaio em relação ao eixo de maior inércia do c.p.); C_{LL} - constante dinâmica (método do ultra-som); E_d - módulo de elasticidade dinâmico (método das ondas de tensão); $f_{M,f}$ - resistência à flexão, posição <i>flatwise</i> (ensaio em relação ao eixo de menor inércia do c.p.); $f_{M,e}$ - resistência à flexão, posição <i>edgewise</i> (ensaio em relação ao eixo de maior inércia do c.p.); $f_{c,0}$ - resistência à compressão paralela às fibras; f_v - resistência ao cisalhamento longitudinal.		

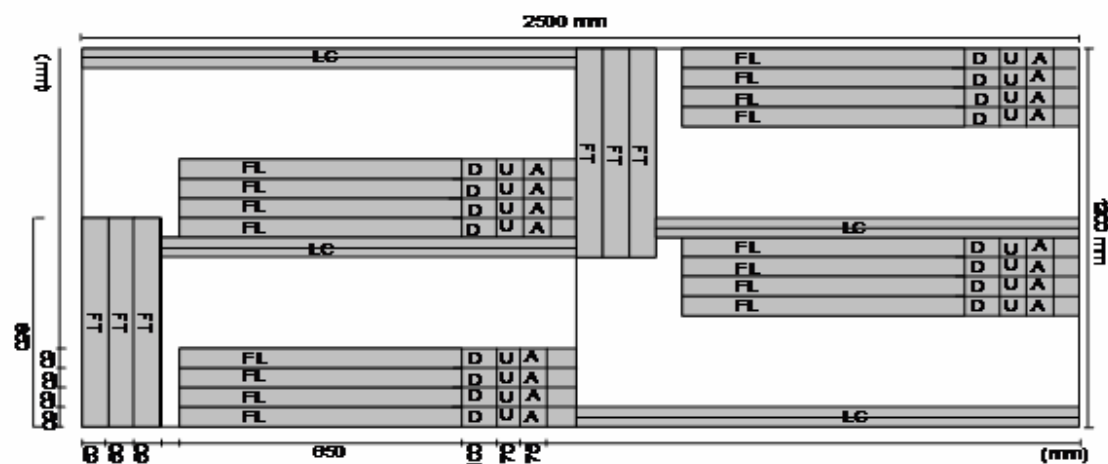
Quadro 8 – Ensaios e normas – painéis LVL de 13 lâminas.

Ensaios	Propriedades	Normas ⁽¹⁾
Flexão estática paralela e perpendicular às fibras	Corpos-de-prova: E _{s,l} f _{M,l} E _{s,t} f _{M,t} E _d (ultra-som) E _d (ondas de tensão)	NBR Projeto 31:000.05-001/3
Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal e transversal no painel LVL e c.p.	E _d (ultra-som) E _d (ondas de tensão)	
Densidade	Densidade aparente (corpos-de-prova)	NBR Projeto 31:000.05-001/3
Umidade	Teor de umidade (corpos-de-prova)	NBR Projeto 31:000.05-001/3
Absorção de água	Absorção de água	NBR Projeto 31:000.05-001/3
Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento	t _{r,seco} - resistência a seco t _{r,a.fria} - resistência à água fria t _{r,a.quente} - resistência à água quente	NBR Projeto 31:000.05-001/3
<p>C_{LL} - constante dinâmica (método do ultra-som); E_d - módulo de elasticidade dinâmico (método das ondas de tensão); E_{s,l} - módulo de elasticidade à flexão longitudinal; E_{s,t} - módulo de elasticidade à flexão transversal; f_{M,l} - resistência à flexão longitudinal; f_{M,t} - resistência à flexão transversal; t_{r,ss} - resistência da colagem ao esforço de cisalhamento – condição: seco; t_{r,af} - resistência da colagem ao esforço de cisalhamento – condição: imersão em água fria; t_{r,aq} - resistência da colagem ao esforço de cisalhamento – condição: imersão em água quente.</p> <p>⁽¹⁾ Projeto 31:000.05-001/3, para Painéis de madeira compensada, da ABNT (Proposta). As prescrições do Projeto são semelhantes àquelas apresentadas no código normativo ISO 12466.</p>		



FE : corpos-de-prova para ensaios de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia *edgewise*;
 FF : corpos-de-prova para ensaios de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia *flatwise*;
 CP : corpos-de-prova para ensaios de compressão paralela às fibras;
 CPE: corpos-de-prova para ensaios de compressão perpendicular às fibras;
 Ci : corpos-de-prova para ensaios de cisalhamento longitudinal.

Figura 7 - Representação esquemática da posição dos corpos-de-prova nos painéis de 25 lâminas.



FT : corpos-de-prova para ensaios de flexão estática (c.p. transversais);
 FL : corpos-de-prova para ensaios de flexão estática (c.p. longitudinais);
 LC : corpos-de-prova para ensaios de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento;
 D : corpos-de-prova para ensaios de densidade;
 U : corpos-de-prova para ensaios de umidade;
 A : corpos-de-prova para ensaios de absorção de água.

Figura 8 – Representação esquemática da posição dos corpos-de-prova nos painéis de 13 lâminas.

Para os painéis de 25 lâminas, antes da realização dos ensaios destrutivos de flexão nos corpos-de-prova, foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e a constante dinâmica C_{LL} , utilizando-se o método de ondas de tensão e o de ultra-som. Nos corpos-de-prova de flexão estática longitudinal dos painéis de 13 lâminas foi calculada somente a constante dinâmica C_{LL} (Figura 9).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP – Botucatu, com os corpos-de-prova acondicionados à temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Os itens seguintes detalham aspectos específicos de alguns dos ensaios realizados.



Figura 9 – Ensaio não-destrutivo de ondas de tensão e ultra-som.

6.5.1 Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia

Esses ensaios foram realizados em corpos-de-prova dos painéis de 13 e 25 lâminas.

a) Painel com 25 lâminas

Para esse caso, os testes foram conduzidos seguindo-se os procedimentos das normas ASTM-D5456, ASTM-D 198 e ASTM-D 4761. Nesse caso, de

flexão em relação ao plano que contém o eixo de menor inércia ou, simplificada, flexão em relação ao eixo de menor inércia, os códigos normativos tratam como flexão flatwise (*flatwise bending*).

Os ensaios foram realizados na Máquina Universal de Ensaio DL 10000 MF, eletromecânica e computadorizada, fabricada pela EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda.

Os 72 corpos-de-prova (4 tratamentos x 3 painéis por tratamento x 6 corpos-de-prova por painel), produzidos na direção longitudinal do painel (Figura 7), tinham dimensões nominais de 55 mm de altura (espessura do painel), 100 mm de largura e 1220 mm de comprimento.

Conforme preconizado pelos códigos normativos, o ensaio foi realizado com cargas aplicadas “nos terços” (cargas aplicadas nos limites do terço médio do vão), relação vão/altura igual a 18 (altura de 50 mm e vão 900 mm), e velocidade de carregamento de 280 kgf/min (Figura 10).



Figura 10 – Painel com 25 lâminas - Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia.

O módulo de elasticidade foi determinado pela inclinação da reta secante à curva carga-deslocamento nos pontos de carregamento (terços do vão), definida pelos pontos ($P_{10\%}$; $a_{10\%}$) e ($P_{40\%}$; $a_{40\%}$) correspondentes, respectivamente a 10% e 40% da carga máxima de ensaio, estimada por meio de corpo-de-prova gêmeo, dado por:

$$E_{s,f} = \frac{60(P_{40\%} - P_{10\%})l^3}{324(a_{40\%} - a_{10\%})bh^3} \quad (7)$$

sendo:

$P_{40\%}$; $P_{10\%}$ - cargas correspondentes respectivamente a 40% e a 10% da carga máxima de ensaio estimada;

$a_{40\%}$; $a_{10\%}$ - deslocamentos da viga (corpo-de-prova) no terço do vão, correspondentes, respectivamente a 40% e a 10% da carga máxima estimada;

l - vão da viga;

b ; h - largura e altura de seção transversal dos corpos-de-prova, respectivamente.

Para esse ensaio, a resistência à flexão ($f_{M,f}$) foi calculada pela expressão:

$$f_{M,f} = \frac{Pl}{bh^2}, \quad (8)$$

sendo:

P - carga de ruptura do corpo-de-prova.

b) Painel com 13 lâminas

Os ensaios de flexão em relação ao eixo de menor inércia dos painéis com 13 lâminas foram realizados atendendo ao prescrito no Projeto de Norma 31:000.05-001/3.

Foram ensaiados 72 corpos-de-prova, com seus comprimentos coincidentes com a direção longitudinal do painel (c.p. longitudinal), e 72 corpos-de-prova com seus comprimentos coincidentes com a direção transversal do painel (c.p. transversal).

Os corpos-de-prova (longitudinais e transversais) tinham dimensões nominais de 25 mm de altura (espessura do painel), 50 mm de largura e 650 mm de comprimento.

O ensaio foi realizado na mesma máquina universal de ensaios, já descrita, com cargas aplicadas no meio do vão (Figura 11), e relação vão/altura igual a 20. Para cada tipo de ensaio (c.p. longitudinal e c.p. transversal), metade do lote foi ensaiada com a capa para cima, e a outra metade foi ensaiada com a capa para baixo.

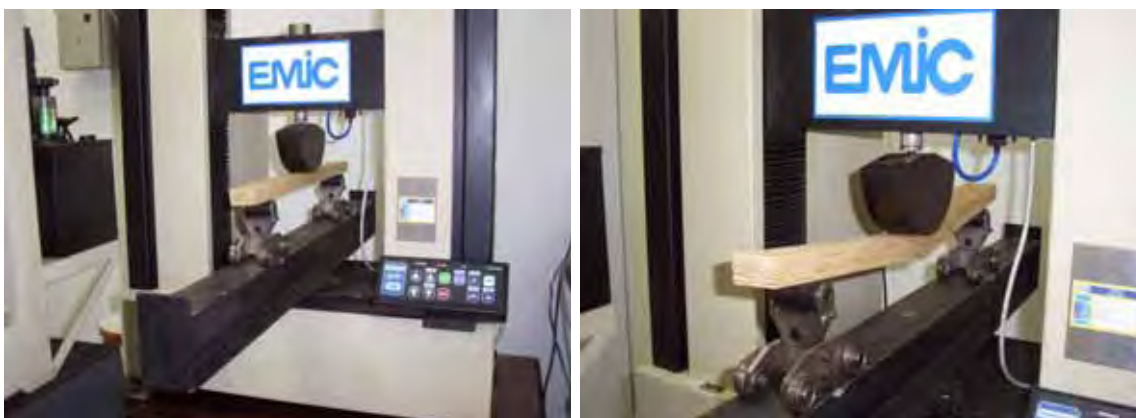


Figura 11 - Painel com 13 lâminas - Ensaio de flexão estática (c.p. longitudinal) em relação ao eixo de menor inércia.

A velocidade da travessa de carregamento da máquina no ensaio dos corpos-de-prova longitudinais foi de 19 mm/min, e nos corpos-de-prova transversais foi de 11 mm/min. Esses valores foram definidos em testes auxiliares, para atendimento ao especificado pelo código normativo: carga de ruptura atingida em 60 ± 30 s.

O módulo de elasticidade foi determinado de maneira análoga ao já descrito, pela inclinação da reta secante à curva carga-deslocamento, com uso da expressão:

$$E_{s,f} = \frac{(P_{40\%} - P_{10\%})l^3}{4(a_{40\%} - a_{10\%})bh^3}, \quad (9)$$

sendo:

$a_{40\%}$; $a_{10\%}$ - deslocamentos da viga (corpo-de-prova) no meio do vão, correspondentes, respectivamente a 40% e a 10% da carga máxima estimada.

Nota: a grandeza módulo de elasticidade recebeu, adicionalmente, o índice “l” ou “t”, representativo das situações de corpo-de-prova longitudinal ou transversal, respectivamente.

A resistência à flexão foi calculada pela expressão:

$$f_M = \frac{1,5Pl}{bh^2}, \quad (10)$$

sendo:

P - carga de ruptura do corpo-de-prova;

Nota: novamente nessa situação, foi adicionado o índice “l” ou “t” ao nome da variável para diferenciar as resistências dos corpos-de-prova longitudinais e transversais, respectivamente.

6.5.2 Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia

Esses ensaios foram realizados em corpos-de-prova dos painéis de 25 lâminas. Foram conduzidos atendendo as prescrições da norma ASTM-D 5456 e métodos ASTM-D 198 e ASTM-D 4761. Esses ensaios são referidos como ensaios de flexão edgewise (*edgewise bending*).

Foram ensaiadas 72 vigas com dimensões nominais de 50 mm de largura (espessura do painel), 100 mm de altura e 2500 mm de comprimento.

Os ensaios foram executados em um pórtico de ensaios desenvolvido no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, com capacidade de 10 tf, fabricado pela SKAY Ltda. (Figura 12). O pórtico de ensaios foi composto por quadro resistente, célula de carga de 10 tf da MSI – Micro Sensores Industrial Ltda., vigas de reação e de carregamento, roletes, contraventamentos laterais, dispositivos de apoio e medidor de deformação digital com sensibilidade de 0,01 mm e fundo de escala de 150 mm, também da MSI.

O ensaio foi realizado com cargas “aplicadas nos terços”, relação vão/altura igual a 18 (altura de 100 mm e vão de 1800 mm) e velocidade de carregamento de 280 kgf/min, levando as peças à ruptura em torno de 10 a 15 minutos. As vigas de LVL foram ainda contraventadas para evitar a perda de estabilidade lateral.

O módulo de elasticidade foi determinado pela inclinação da reta secante à curva carga-deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos ($P_{10\%}$; $a_{10\%}$) e ($P_{40\%}$; $a_{40\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 40% da carga máxima de ruptura, estimada por meio de corpos-de-prova adicional.

O módulo de elasticidade ($E_{s,e}$) foi determinado através da equação:

$$E_{s,e} = \frac{12(P_{40} - P_{10})l^3}{432(a_{40} - a_{10})bh^3} \quad (11)$$

Conforme ilustrado na Figura 12-b, os deslocamentos foram avaliados pelo diferencial de deformação entre o centro do vão livre e os pontos de carregamento (terços do vão).

Por essa metodologia obtinha-se o módulo de elasticidade real ou efetivo, em contraposição ao módulo de elasticidade aparente, avaliado nos ensaios de flexão convencionais. O módulo de elasticidade real é maior que o módulo de elasticidade aparente.

A resistência à flexão foi calculada pela expressão (8).



Figura 12– Painel de 25 lâminas - Ensaio de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia – *edgewise*; a) no pórtico de ensaios; b) avaliação da deformação da viga; c) viga na iminência da ruptura; d) viga já rompida.

6.5.3 Ensaio de compressão paralela às fibras

Para a caracterização dos painéis LVL de 25 lâminas, foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova retirados dos painéis. Os corpos-de-prova tinham dimensões nominais de 50 mm (largura 1), 50 mm (largura 2, correspondente à espessura do painel) e 150 mm de comprimento.

Os ensaios foram executados em Prensa de Ensaio, eletro-hidráulica, com capacidade de 1000 kN, ligada a um sistema de aquisição de dados MTest da EMIC.

Os procedimentos de ensaio, velocidade de carregamento, programa de ensaio e obtenção dos resultados seguiram as especificações das normas ASTM-D 5456 e métodos ASTM-D 198 e ASTM-D 4761.

A Figura 13 ilustra o aparato geral de ensaio. No ensaio foi avaliada exclusivamente a resistência à compressão paralela às fibras.



Figura 13– Painel de 25 lâminas - Ensaio de compressão paralela às fibras.

6.5.4 Ensaio de compressão perpendicular às fibras

Dos painéis LVL de 25 lâminas foram também produzidos corpos-de-prova para realização de ensaios de compressão perpendicular às fibras. Os corpos-de-prova foram produzidos com as mesmas dimensões dos corpos-de-prova de compressão paralela às fibras. Os ensaios foram executados em Máquina Universal de Ensaio DL 10000 -EMIC, eletromecânica, com capacidade de 100 kN, seguindo-se os procedimentos de ensaio da norma ASTM-D 5456 e métodos ASTM-D 198 e ASTM-D 4761.

O carregamento foi aplicado na face de menor dimensão, em direção perpendicular ao plano de colagem das lâminas (Figura 14), com velocidade de 0,305 mm/min.

A curva carga-deformação foi determinada até o corpo-de-prova atingir a deformação de 2,5 mm, quando o ensaio foi interrompido.

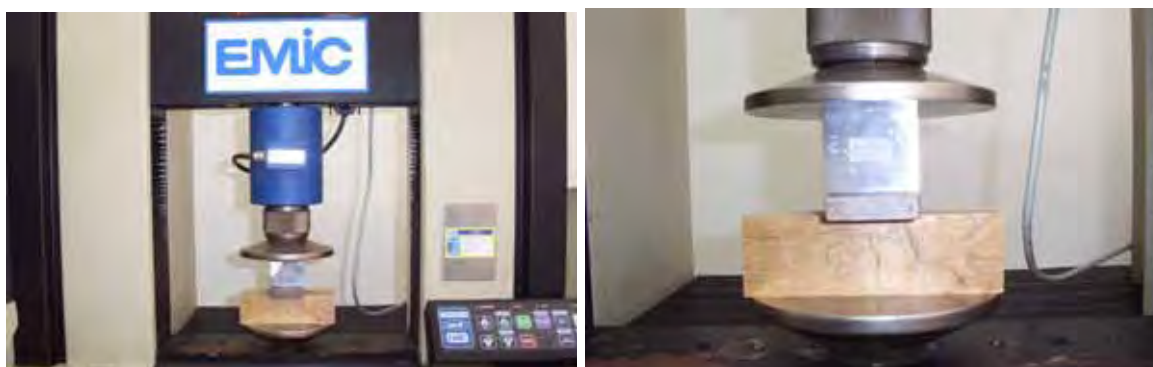


Figura 14 – Painel de 25 lâminas - Ensaio de compressão perpendicular às fibras.

6.5.5 Ensaio de cisalhamento longitudinal

Seguindo-se as orientações e especificações da norma ASTM-D 5456 e métodos ASTM-D 198 e ASTM-D 4761, foram realizados ensaios de cisalhamento longitudinal (no plano L-X) em corpos-de-prova retirados dos painéis LVL de 25 lâminas, executados em Máquina Universal de Ensaios DL 10000 - EMIC, eletromecânica, com capacidade de 100 kN.

Os corpos-de-prova foram produzidos com entalhe para apoio do cutelo de carga e com seção resistente ao cisalhamento medindo 50 mm x 50 mm, conforme ilustrado na figura 15. O cisalhamento foi induzido em plano paralelo (não necessariamente coincidente) ao plano de colagem das lâminas, a uma velocidade de 0,6 mm/min.

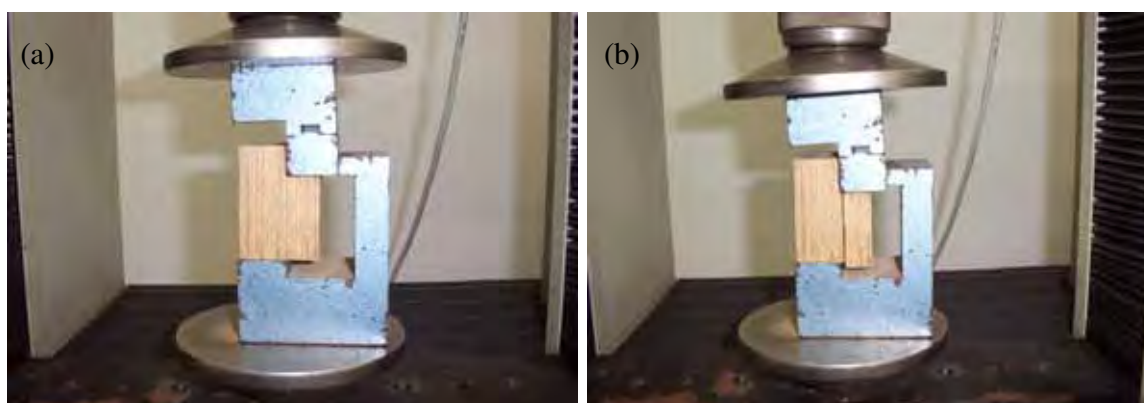


Figura 15 - Painel de 25 lâminas - Ensaio de cisalhamento longitudinal; a) vista geral do equipamento; b) detalhe do corpo-de-prova já rompido.

6.5.6 Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento – painel de 13 lâminas

Com a finalidade de avaliar a qualidade da linha de cola dos painéis LVL de 13 lâminas, foram realizados ensaios de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, atendendo às prescrições do Projeto 31:000.05-001/3.

Foram retirados 18 corpos-de-prova por painel (seis corpos-de-prova para resistência à seco, seis para resistência após umedecimento em água fria e seis para resistência após umedecimento em água quente – teste de fervura), com dimensões nominais de 150 de comprimento e 25 mm de largura.

Os ensaios de resistência à seco foram realizados nos corpos-de-prova após climatização. A resistência após umedecimento em água fria ou, simplesmente, resistência da colagem à água fria foi avaliada após submersão dos corpos-de-prova em água a $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas; a resistência à água quente foi determinada após submissão dos corpos-de-prova a um ciclo de fervura em água quente por 6 horas, seguido de resfriamento em água fria ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) durante uma hora.

Todos os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaio DL 10000 EMIC, eletromecânica, com capacidade de 100 kN, com velocidade constante de 6 mm/min (Figura 16).

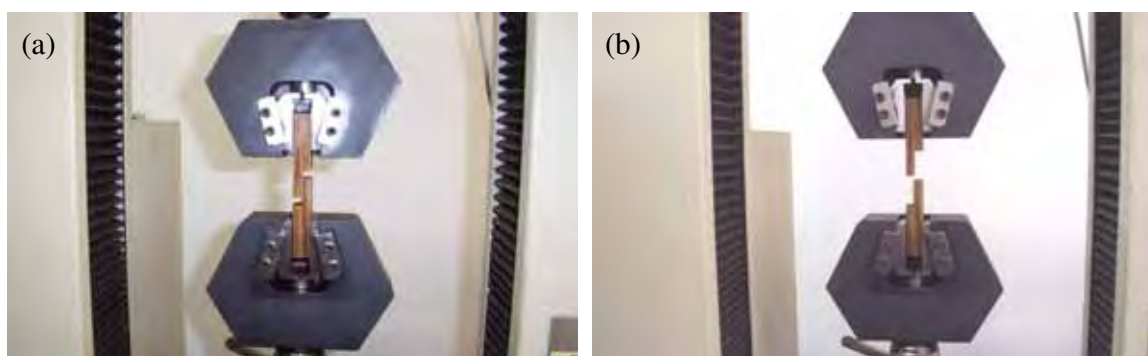


Figura 16 Painel de 13 lâminas - Ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento. a) situação inicial do ensaio; b) situação final do ensaio, após ruptura do corpo-de-prova.

Nesse ensaio foi também estimada a porcentagem de falha na madeira (FM), seguindo-se a orientação apresentada de forma ilustrada pelo Projeto 31:000.05-001/3, para painéis de madeira compensada.

6.6 Cálculo do módulo de elasticidade teórico dos painéis LVL - corpos-de-prova - com uso da homogeneização da seção transversal

Foram determinados os valores do módulo de elasticidade teórico (E_T) dos painéis LVL, homogeneizando-se a seção transversal dos corpos-de-prova de flexão, com base nas relações entre o módulo de elasticidade das lâminas que compõem o painel e um módulo de elasticidade de referência. Para este último valor foi assumido o valor da mediana da constante dinâmica (C_{LL}) das lâminas, obtida pelo método de ultra-som.

Para a homogeneização da seção transversal foram mantidos constantes os módulos de elasticidade das lâminas que compõem o corpo-de-prova, alterando-se suas larguras (largura homogeneizada) em função da relação entre o módulo da lâmina e o módulo de referência. A seção assim obtida (seção homogeneizada) apresentava, pois, uma largura específica para cada lâmina (Eq. 12). Para ela foi calculada a posição do centro de gravidade (Eq. 13) e, posteriormente o momento de inércia da seção homogeneizada (Equação 14) e avaliado o módulo de elasticidade teórico (Equação 15). A Figura 17 ilustra o procedimento de obtenção do momento de inércia da seção homogeneizada.

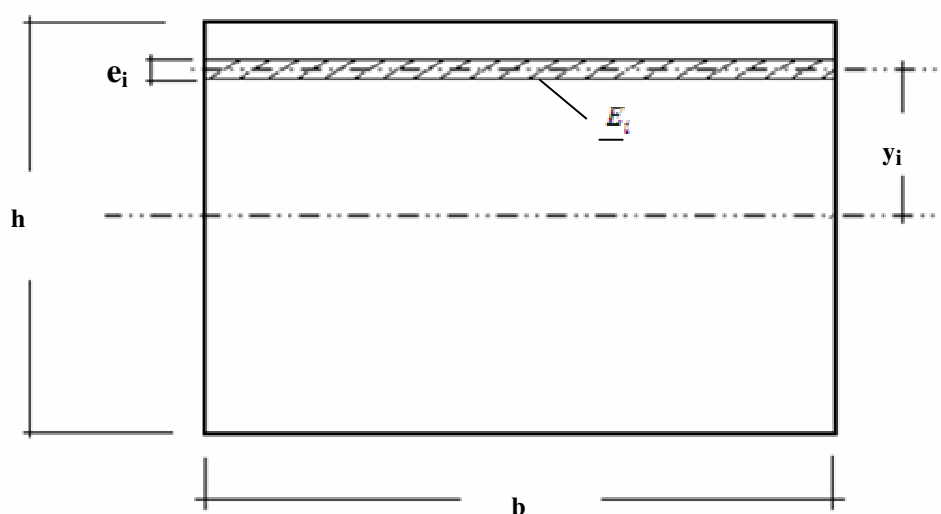


Figura 17 – Esquema da seção transversal de um painel LVL para o cálculo do E_T .

$$b_{ef,i} = \frac{E_t}{E_r} \times b \quad (12)$$

$$Y''_{CGpanel} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i e_i \left(\sum_{j=1}^{i-1} e_j + \frac{e_i}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n E_i e_i} \quad (13)$$

$$I_h = \sum_{i=1}^n \frac{(b_{ef,i} \times e_i^3)}{12} + (b_{ef,i} \times e_i) \times y_i^2 \quad (14)$$

$$E_t = \frac{I_h}{I} \times E_R \quad (15)$$

onde:

- I_h - momento de inércia da seção homogeneizada
- I - momento de inércia da seção transversal original, em relação à sua linha neutra
($I = bh^3/12$)
- E_T - módulo de elasticidade teórico da seção transversal
- E_R - módulo de elasticidade de referência (assumido como a mediana da constante dinâmica de todas as lâminas utilizadas no programa experimental)
- E_i - módulo de elasticidade da i-ésima lâmina
- $b_{ef,i}$ - largura efetiva da i-ésima lâmina
- e_i - espessura da i-ésima lâmina
- y_i - distância do centro de gravidade da i-ésima lâmina ao centro de gravidade do painel
- h - altura (espessura) do painel
- b - largura da seção transversal do corpo-de-prova
- n - número total de lâminas

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Ensaio preliminares

7.1.1 Variação do módulo de elasticidade dinâmico nas bordas e centro dos painéis

Os resultados obtidos para os módulos de elasticidade dinâmicos (E_d) mensurados no centro e nas bordas de 510 lâminas com espessura de 2,8 mm estão resumidos no Quadro 9.

Quadro 9 - Ensaio preliminares - Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) obtido com mensurações no centro e nas bordas das lâminas.

	E_d (MPa) centro	E_d (MPa) borda
Média	11481	11470
Valor máximo	18653	18640
Valor mínimo	4610	4252

Buscando a avaliação da igualdade estatística dos valores mensurados nas duas posições (faixas) das lâminas, foi realizado teste de comparação de médias (Teste t), e os resultados estão reportados no Quadro 10.

Quadro 10 – Ensaio preliminares - Resultados principais para o teste de comparação de médias - mensuração do módulo dinâmico na borda e no centro da lâmina.

	N	Média (MPa)	Desvio-padrão	Erro padrão da média
Centro	510	11481	2880	128
Borda	510	11470	2736	121
Diferença	510	11,3	1886,1	83,5

Intervalo de confiança (95%) para as diferenças entre médias: (-152,7; 175,4)
 Teste t para diferença entre médias: $t\text{-value} = 0,14$; $p\text{-value} = 0,892$

Observa-se que o p-valor ($p\text{-value}$) é muito superior a 0,05, indicando a igualdade estatística entre as medições nas duas posições (centro e borda da lâmina).

Dessa forma, os resultados abonam a prática de mensuração da variável módulo dinâmico das lâminas numa única faixa, que é representativa da lâmina. Por facilidade de operação, foi definida a mensuração dessa variável na região central de cada lâmina.

Os resultados dessas análises preliminares mostraram, ainda, uma boa correlação entre as medições nas duas faixas, conforme se pode observar na Figura 18. A correlação de Pearson (R) encontrada entre os valores avaliados para o módulo dinâmico nas duas posições (centro e borda) das lâminas foi de 0,776.

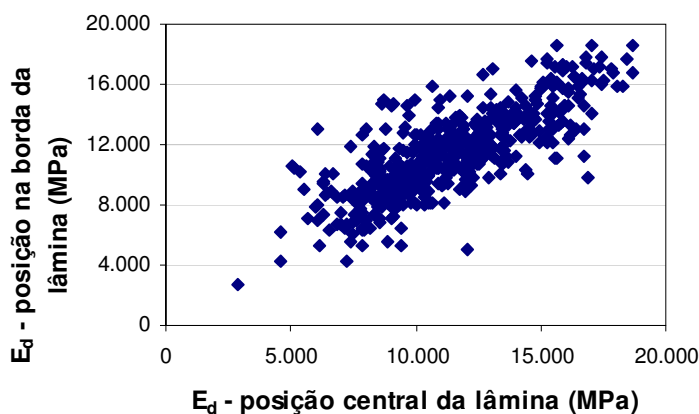


Figura 18 - Ensaio preliminares - Módulo de elasticidade do centro e das bordas das lâminas.

Os resultados dos módulos de elasticidade para todas as 510 lâminas estão apresentados no Anexo 1.

7.1.2 Tempo e temperatura de prensagem dos painéis LVL laboratoriais

Conforme descrito na metodologia, esses ensaios preliminares foram realizados em um painel de 9 lâminas (LVL-9) e dois painéis de 17 lâminas (LVL-17A e LVL-17B).

Pelas relações empíricas já apresentadas, os tempos de prensagem dos painéis de 9 e 17 lâminas foram estimados em 30 min e 52,4 min, considerando-se que foram confeccionados com lâminas com espessura nominal de 2,8 mm.

Os painéis foram, intencionalmente, prensados durante tempos superiores aos avaliados pelas orientações do fabricante, objetivando uma análise mais completa da variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem e de sua estabilização. Os resultados completos obtidos nesses ensaios encontram-se no Anexo 2.

As Figuras 19 e 20 ilustram a elevação da temperatura em função do tempo de prensagem nos painéis LVL-9 e LVL-17-1 até a linha de cola mais profunda.

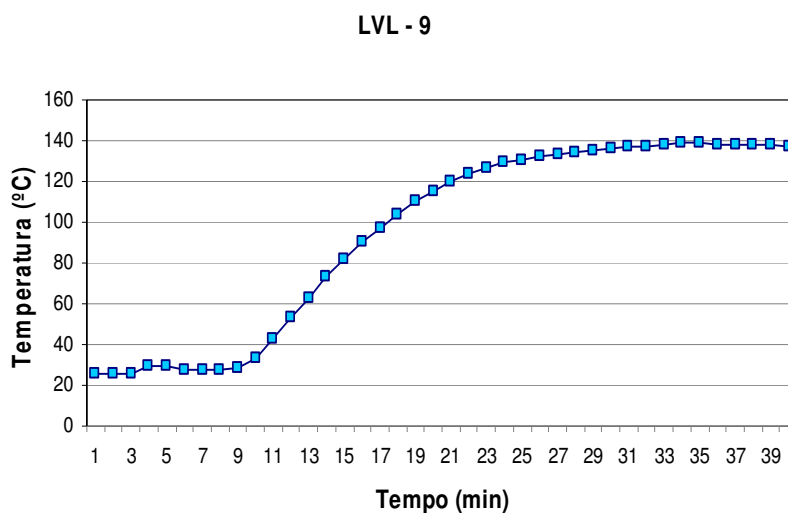


Figura 19 - Ensaios preliminares - LVL 9 - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem - temperatura avaliada na linha de cola mais profunda do painel.

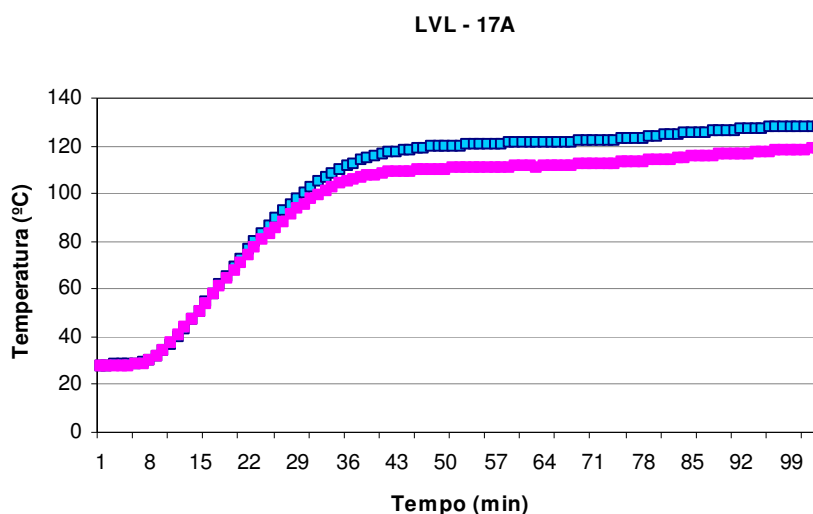


Figura 20 - Ensaio preliminar - LVL 17A - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem - temperaturas T1 e T2 avaliadas na lâmina de cola mais profunda, com o termopar T1 localizado no centro geométrico do painel e T2 localizado no mesmo plano, a 15 cm de T1.

O perfil da elevação da temperatura observado na linha mais profunda de colagem no painel LVL-9 (Figura 19) mostra um aumento gradual da temperatura a partir do início do processo de prensagem, durante cerca de 30 minutos, até atingir-se uma temperatura de 140°C, que se mantém constante a partir desse ponto. No painel LVL-17-A (Figura 20) o tempo de prensagem necessário para se atingir uma temperatura aproximadamente constante de 120°C no centro do painel foi 56 minutos.

Estes resultados, sumarizados no Quadro 6, mostram que os tempos calculados pela relação empírica recomendada pelo fabricante são semelhantes aos encontrados nas Figuras 19 e 20.

A temperatura alcançada no centro dos painéis foi adequada para a cura do adesivo utilizado. Estes valores são semelhantes aos valores mínimos apresentados por outros autores e fabricantes destes adesivos, segundo os quais temperaturas mínimas entre 100°C a 105°C no centro dos painéis laminados e colados com adesivos fenólicos, são suficientes para atingir uma cura adequada da resina.

A Figura 21 ilustra a elevação da temperatura em relação ao tempo de prensagem em algumas linhas de cola do painel LVL-17-B, onde T4 corresponde ao termopar localizado na linha de cola mais profunda.

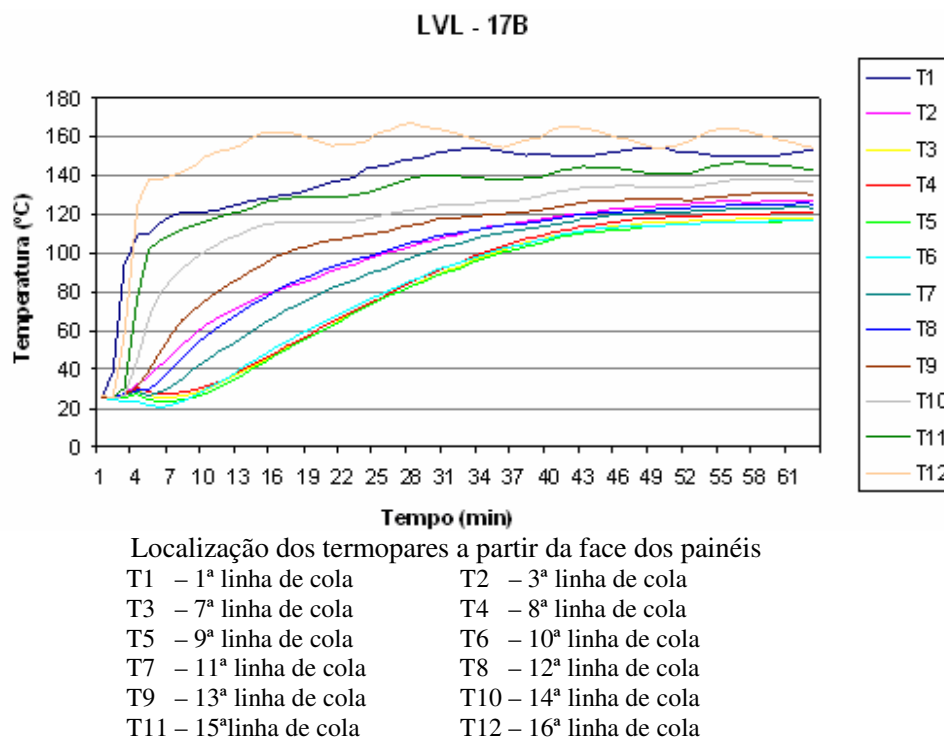


Figura 21 - Ensaio preliminares - LVL 17B - Variação da temperatura nas diferentes linhas de cola em relação ao tempo de prensagem.

Deu-se prioridade à análise do tempo e temperatura no centro da espessura do painel (T4 e T5), uma vez que a cura completa do adesivo ocorre após certo período em que a temperatura neste local atinge a temperatura de cura da cola requerida, que neste caso era de 120 a 125°C, segundo as recomendações do fabricante.

No painel LVL-17B observou-se que as temperaturas nas linhas de cola mais externas (T1 e T2) elevaram-se mais rapidamente, variando decrescentemente entre linhas, na medida em que se avança para o meio da espessura do painel.

Isso ocorreu porque as faces superior e inferior entraram primeiramente em contato com os pratos aquecidos, após seu fechamento, enquanto que as linhas de cola no interior recebem o calor indiretamente, sem que haja contato direto com os pratos quentes. Notou-se também que a temperatura na face inferior (16ª linha de cola - T12)

elevou-se mais rapidamente que na face superior (1ª linha de cola - T1), isso ocorre porque a face superior somente entrou em contato com o prato aquecido após seu fechamento, enquanto que a face inferior entrou em contato com o prato assim que o painel foi posto para a prensagem.

Já no centro da chapa (9ª e 8ª linhas de cola – T4 e T5, respectivamente) a temperatura elevou-se mais lentamente que nas faces, permanecendo aproximadamente constante a partir de 53 minutos, quando a temperatura atingiu 120°C.

De uma forma geral o perfil da elevação da temperatura observado no centro dos painéis e nas faces foi semelhante aos observados nos compósitos de madeira, conforme descrito por Bolton et al. (1989), Zombori (2001) e Calegari et al. (2000).

Os valores da temperatura de cura do adesivo fenol-formaldeído aqui utilizados (120-125°C) são também semelhantes aos valores mínimos apresentados por outros autores e fabricantes destes adesivos.

Segundo Daí e Wang (2004) temperaturas entre 100 a 105°C no centro de painéis LVL, colados com adesivos fenólicos, são suficientes para atingir uma cura adequada da resina. Estes mesmos autores sugerem, de uma forma geral, que painéis grossos prensados à quente acumulam uma maior quantidade de calor de reserva em seu interior que se conserva após a prensagem, situação esta que permite o uso de menores temperaturas de cura. Alguns autores, contudo, sugerem temperatura mínima de cura para resinas fenólicas de aproximadamente 100°C.

7.1.3 Tempo e temperatura de prensagem dos painéis LVL de dimensões comerciais

Conforme já descrito, foram preliminarmente confeccionados três painéis de dimensões comerciais (largura de 1220 mm e comprimento de 2440 mm). Um painel foi produzido com 15 lâminas de 2,2 mm - LVL 15 - com espessura final de 33 mm e dois foram produzidos com 25 lâminas - LVL 25A e LVL 25B - com espessura final de 55 mm.

Os resultados completos dessas análises encontram-se no Anexo 3.

As Figuras 22 e 23 ilustram a elevação da temperatura em função do tempo de prensagem nos painéis, quando monitoradas as temperaturas nas linhas de cola mais

externa (face) e mais profunda (centro). Também neste ensaio deu-se preferência para a avaliação do tempo e temperatura no centro do painel (linha de cola mais profunda) pelas mesmas razões já apresentadas no item anterior.

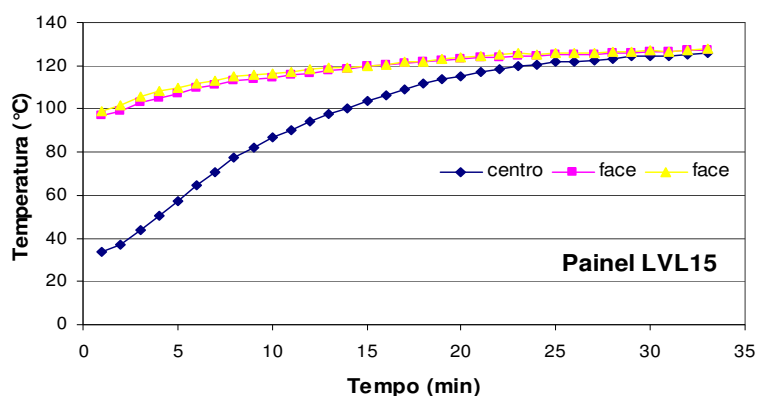


Figura 22 - Ensaio preliminares - LVL comercial 15 - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem.

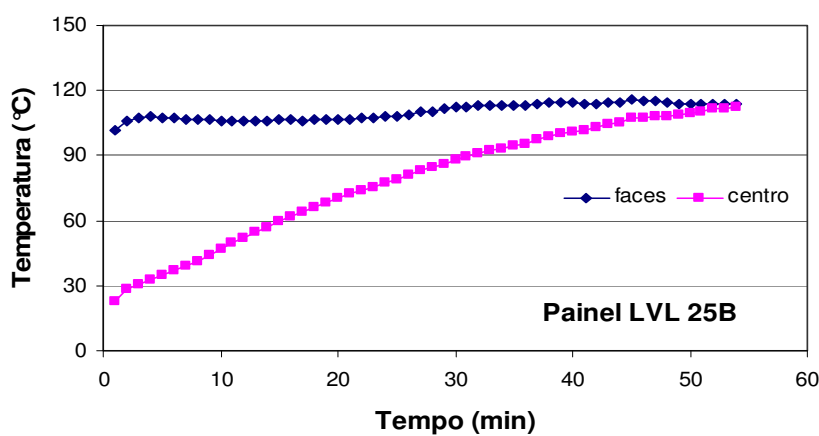


Figura 23 - Ensaio preliminares - LVL comercial 25B - Variação da temperatura em relação ao tempo de prensagem.

O perfil da elevação da temperatura observado na linha de cola mais profunda no painel LVL-15 mostra um aumento gradual da temperatura a partir do início do processo de prensagem por um período de 32 minutos, até atingir uma temperatura de 125°C, que se mantém constante a partir desse tempo. No painel LVL-25B o tempo de prensagem foi

de 55 minutos, até ser atingida uma temperatura de, aproximadamente, 115°C no centro do painel.

Estes resultados mostram, mais uma vez, que os tempos calculados pela relação recomendada pelo fabricante para a temperatura nos pratos da prensa são semelhantes aos encontrados nos gráficos de temperatura (Quadro 6). A temperatura alcançada no centro dos painéis foi adequada para a cura do adesivo utilizado, de acordo com o fabricante da resina utilizada e aos valores publicados por alguns pesquisadores, como já indicado no item anterior.

7.2 Classificação das lâminas – ensaios principais

O Quadro 11 apresenta valores das grandezas mensuradas nas 500 lâminas utilizadas na produção dos painéis para os ensaios principais. Os resultados completos dessas análises encontram-se no Anexo 4.

Quadro 11 – Valores de algumas propriedades das lâminas.

	Espes. (mm)	Massa (g)	Dens. (g/cm ³)	Ultra-som		Ondas de tensão	
				Veloc. (m/s)	C _{LL} (MPa)	Veloc. (m/s)	E _d (MPa)
média	2,1	4411	0,617	4887	15026	4938	15379
mediana	2,0	4433	0,619	5006	15829	5088	15972
mínimo	1,8	2870	0,402	3364	5581	2755	3694
máximo	2,6	6973	0,893	5799	23188	5910	24371

Na Figura 24 são apresentadas as dispersões dos valores da constante dinâmica C_{LL} (obtida no ensaio com ondas de ultra-som) e do módulo de elasticidade dinâmico E_d (obtido no ensaio de ondas de tensão).

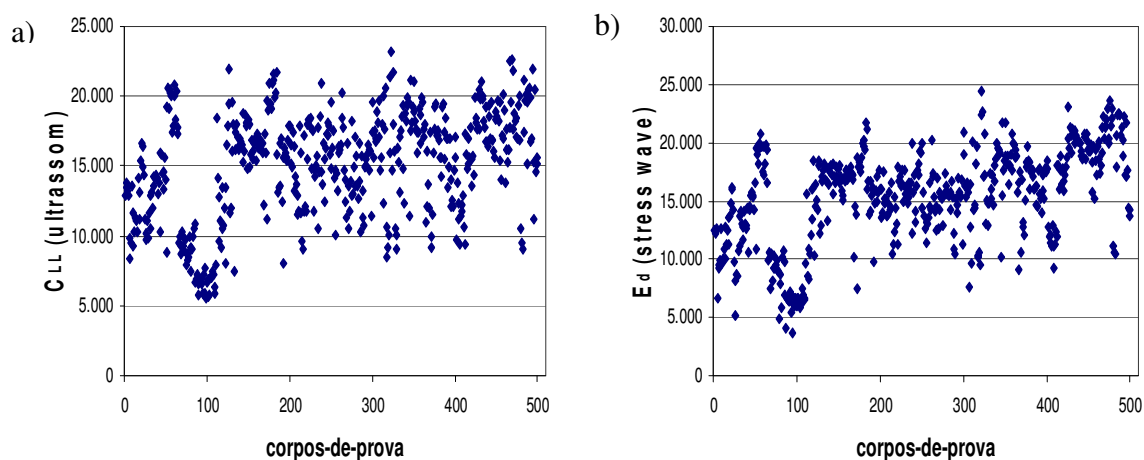


Figura 24 - Dispersão dos valores da constante dinâmica (C_{LL} - figura 24 a) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_d - figura 24 b) obtida na análise das 500 lâminas utilizadas nos ensaios principais.

Os grupos de alto e baixo módulos de elasticidade foram estabelecidos utilizando-se como divisor a mediana do C_{LL} , apresentada no Quadro 11. Assim, lâminas com C_{LL} menor que 15829 MPa foram enquadradas como de baixo módulo de elasticidade. Contrariamente, lâminas com C_{LL} maior ou igual a 15829 MPa foram consideradas de alto módulo de elasticidade. A opção pela utilização dos resultados do ensaio de ultra-som na separação das lâminas em dois lotes foi feita considerando-se que existe um maior número de trabalhos científicos bem como de procedimentos comerciais com a utilização desse método.

7.3 Propriedades físicas de painéis LVL de 13 lâminas

7.3.1 Resultados obtidos nos painéis

7.3.1.1 Empenamento

O Quadro 12 apresenta os resultados das medições de empenamento nos painéis de 13 lâminas. O ponto A foi o ponto de referência para todos os painéis.

Quadro 12 – Painel de 13 lâminas – empenamento

Tratam.	Empenamento (mm)								
	Painel	A	B	C	D	E	F	G	H
T1-LVL	13	0	34	0	0	8	6	65	52
	14	0	12	0	0	88	0	106	183
	15	0	7	0	0	77	0	75	164
T2-LVL	16	0	13	0	0	0	0	29	63
	17	0	4	0	5	6	0	4	27
	18	0	0	59	34	35	38	0	6
T3-LVL	19	0	0	12	0	0	8	4	0
	20	0	0	0	5	10	0	5	29
	21	0	0	0	0	0	0	6	12
T4-LVL	22	0	0	0	0	0	0	0	20
	23	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0

Localização dos pontos de medição do empenamento no painel

A	D	F
B		G
C	E	H

Através de um ponto do painel apoiado no chão com uma pequena pressão (ponto A), todos os lados e extremidades do painel foram medidos com o auxílio de uma régua graduada, a fim de se medir possíveis empenamentos no painel. Somente os painéis de 13 lâminas receberam essa avaliação, pois os painéis de 25 lâminas não apresentaram empenamentos.

O tratamento 4 foi o que apresentou menores valores de empenamento.

Esses empenamentos se devem provavelmente a tensões internas dos painéis. Para amenizar esse problema, alguns autores indicam colocar algumas lâminas (normalmente três) na direção transversal do painel.

7.3.1.2 Densidade aparente

Para facilitar a interpretação dos resultados que se seguem, a cada tratamento estatístico estudado foi associado um adjetivo que o representa, considerando-se a forma de sua produção. Assim, o painel do tratamento T1 foi denominado superior, por contar, exclusivamente com lâminas de alto módulo de elasticidade. Contrariamente, T2

recebeu o adjetivo inferior. O tratamento T3 foi denominado racional, por usar lâminas de alto módulo de elasticidade nas faces do painel e o tratamento T4 foi denominado alternado por apresentar disposição alternada de lâminas de alto e baixo módulo de elasticidade. No Quadro 13 são apresentados valores da densidade aparente, avaliada diretamente nos painéis (e não em corpos-de-prova deles representativos).

O Quadro 13 resume os valores obtidos de densidade aparente dos painéis de 13 lâminas.

Quadro 13 – Painel de 13 lâminas - Valores da densidade aparente.

Densidade aparente (g/cm ³)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	0,703	0,664	0,696	0,744
Mínimo	0,688	0,651	0,685	0,731
Máximo	0,723	0,688	0,707	0,751
D.Padrão	0,0181	0,0210	0,0109	0,0108
C.V.(%)	2,57	3,16	1,56	1,45

Considerando-se que a densidade aparente média dos pinus tropicais (*P. caribae* var. *caribae*, *P. caribae* var. *bahamensis*, *P. caribae* var. *hondurensis* e *P. oocarpa*) a 12% de umidade, reportada pela NBR 7190 (ABNT, 1997) é de 0,547 g/cm³, verifica-se que todos os painéis ultrapassaram esse valor referencial.

Em geral, a densidade de um painel laminado como o compensado e o LVL depende da espécie, da predominância de lenho tardio que apresentam as lâminas, da umidade, pressão e temperatura usadas na fabricação. Para a faixa de pressões de 7 kgf/cm² a 21 kgf/cm², normalmente usadas na indústria, ocorre uma retração de aproximadamente 5% a 10% para um teor de umidade de lâminas de até 10%, ocasionando uma redução do volume por esmagamento, principalmente do lenho inicial e um leve aumento da densidade do produto comprimido. Sendo assim, a densidade de um compensado e de um LVL é um pouco maior do que da madeira sólida (KOLLMANN et al., 1975; WELLONS et al., 1983 e BIER, 1983).

Todos os tratamentos estudados apresentaram densidade aparente média superior a igual parâmetro avaliado para as lâminas originais. ($\rho_{ap,média} = 0,617$ g/cm³).

Observou-se, ainda, um baixo coeficiente de variação para a densidade aparente nos quatro tratamentos.

7.3.2 Resultados obtidos nos corpos-de-prova

Os Quadros 14 a 16 apresentam valores das propriedades físicas mensuradas em corpos-de-prova dos painéis de 13 lâminas, com os testes de comparação de médias.

Quadro 14– Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores da densidade aparente.

Densidade aparente (g/cm ³)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	0,721 B	0,685 C	0,703 BC	0,753 A
Mínimo	0,672	0,605	0,660	0,712
Máximo	0,761	0,732	0,754	0,780
D.Padrão	0,022	0,037	0,026	0,020
C.V.(%)	3,05	5,34	3,69	2,69

Os valores mensurados nos corpos-de-prova para a densidade aparente são semelhantes àqueles encontrados por mensurações diretas nos painéis correspondentes.

Os tratamentos T1 e T4, novamente apresentaram o mesmo comportamento que os painéis, ou seja, maiores valores em relação aos tratamentos T2 e T3. Este comportamento pode ser explicado com as mesmas observações já apresentadas no item 5.3.1.2.

Quadro 15 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores da umidade.

Umidade (%)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	10,15 B	10,88 A	10,14 B	10,68 A
Mínimo	9,70	10,44	9,17	10,23
Máximo	10,64	11,42	11,07	11,39
D.Padrão	0,247	0,2447	0,553	0,325
C.V.(%)	2,44	2,25	5,45	3,05

Quadro 16 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de absorção de água.

Absorção de água (%)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	29,58 B	37,26 A	34,09 A	27,83 B
Mínimo	24,93	27,15	25,42	22,66
Máximo	37,04	46,11	43,27	33,90
D.Padrão	3,731	5,142	5,183	3,142
C.V.(%)	12,61	13,80	15,20	11,29

Os valores médios de absorção total de água (Quadro 16) para os quatro tratamentos foram semelhantes aos valores apresentados por outros autores (23% a 36%), que trabalharam com painéis de densidades equivalentes, tais como Bortoletto (2003) e Iwakiri (1998).

Pode-se verificar que os tratamentos que obtiveram maiores valores médios de densidade (T1 e T4) obtiveram valores mais baixos de absorção de água.

Este fato pode ter sido influenciado pela origem das lâminas, já que a velocidade de admissão de água depende, como na madeira sólida (in-natura), da densidade, do tamanho e da espessura das chapas, principalmente.

Em geral as lâminas e painéis laminados absorvem água mais rápido que a madeira sólida (KOLLMANN et al, 1975). Uma outra razão do aumento ou diminuição de umidade é a influência do tipo de cola usada, dependendo do grau de afinidade desta com a água. As linhas de cola atuam como uma barreira à penetração de água nas camadas de lâminas internas. Isso se deve ao adesivo fenólico, que não é higroscópico após a cura.

7.4 Propriedades mecânicas dos painéis LVL de 13 lâminas

7.4.1 Resultados obtidos por ensaios não-destrutivos nos painéis

7.4.1.1 Método das ondas de tensão

Os Quadros 17 e 18 apresentam, respectivamente, os valores de velocidade e módulo de elasticidade dinâmico, obtidos a partir do ensaio não-destrutivo das ondas de tensão, com mensurações na direção longitudinal dos painéis.

Quadro 17 - Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5394	5130	5301	5196
Mínimo	5218	4993	5187	4937
Máximo	5566	5213	5510	5426
D.Padrão	95,2	78,8	109,7	191,5
C.V.(%)	1,76	1,54	2,07	3,69

Quadro 18 - Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel.

E _d (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	20458	17479	19567	20115
Mínimo	19697	16825	18856	17825
Máximo	21329	18598	20805	22108
D.Padrão	519,2	542,2	615,4	1703,6
C.V.(%)	2,54	3,10	3,15	8,47

Os Quadros 19 e 20 apresentam os resultados quando as medições ocorreram na direção transversal do painel.

Quadro 19 - Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção transversal do painel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1435	1380	1469	1464
Mínimo	1371	1358	1438	1380
Máximo	1516	1408	1495	1545
D.Padrão	59,9	24,0	24,5	71,9
C.V.(%)	4,18	1,74	1,67	4,91

Quadro 20 - Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos pelo método de ondas de tensão na direção transversal.

E_d (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1452	1266	1510	1599
Mínimo	1294	1181	1440	1375
Máximo	1663	1365	1580	1792
D.Padrão	155,1	77,2	56,5	173,9
C.V.(%)	10,68	6,10	3,75	10,87

Os valores obtidos confirmam que painéis produzidos com lâminas com alto módulo de elasticidade mantêm, no geral, altos módulos de elasticidade. O tratamento 1 apresentou os maiores valores de velocidade de propagação da onda e de módulo de elasticidade dinâmico, conforme poderia ser esperado. Os painéis constituídos por lâminas alternadas apresentaram um bom desempenho médio do módulo de elasticidade dinâmico, devido aos altos valores de densidade dos painéis.

Os resultados apresentados no Quadro 19 obtidos reforçam a relação entre valores das propriedades de rigidez nas direções transversal e longitudinal do painel. Alguns autores relatam que valores dessa propriedade na transversal correspondem a aproximadamente de 1/15 a 1/20 daqueles encontrados na direção longitudinal do painel. Para madeira sólida essa relação varia de 1/12 a 1/20 (BODIG & JAYNE, 1993).

7.4.1.2 Método do ultra-som

Nos Quadros 21 a 24 são representados os valores obtidos para velocidade de propagação e constante dinâmica (C_{LL}) nos ensaios de ultra-som com ondas induzidas nas direções longitudinal e transversal dos painéis.

Quadro 21 - Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som na direção longitudinal do painel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5739	5453	5638	5538
Mínimo	5565	5304	5543	5207
Máximo	5893	5541	5849	5756
D.Padrão	94,0	84,4	98,4	209,7
C.V.(%)	1,63	1,55	1,75	3,79

Quadro 22 - Pannel de 13 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som na direção longitudinal do pannel.

C_{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	23160	19752	22135	22852
Mínimo	22401	18319	21407	19827
Máximo	23910	21137	23442	24882
D.Padrão	398,8	799,6	628,1	1973,1
C.V.(%)	1,72	4,05	2,84	8,63

Quadro 23 - Pannel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som na direção transversal do pannel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1481	1448	1470	1539
Mínimo	1357	1426	1432	1428
Máximo	1585	1470	1500	1613
D.Padrão	96,5	17,8	29,3	80,5
C.V.(%)	6,51	1,23	1,99	5,23

Quadro 24 - Pannel de 13 lâminas – Valores de constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som na direção transversal do pannel.

C_{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1551	1393	1506	1767
Mínimo	1267	1324	1406	1492
Máximo	1816	1487	1591	1954
D.Padrão	233,7	73,0	78,5	202,8
C.V.(%)	15,07	5,24	5,21	11,48

Na direção longitudinal o tratamento 1 obteve maiores médias para as variáveis velocidade de propagação das ondas e módulo de elasticidade dinâmico (C_{LL}), conforme poderia ser esperado.

Os coeficientes de variação das constantes dinâmicas mostram que, na direção transversal, os valores são mais dispersos do que os obtidos na direção longitudinal.

Novamente ficou confirmada a proporcionalidade dos valores obtidos nos ensaios de ondas de tensão, mantendo os valores aproximados de 1/15 do módulo de

elasticidade na direção transversal do painel em relação ao módulo obtido na direção longitudinal.

Quando comparados os dois métodos empregados, verifica-se que sistematicamente, as ondas de ultra-som se propagaram com maior velocidade que as ondas de tensão, sobretudo nos ensaios na direção longitudinal.

Na direção transversal ocorreu, no geral, o mesmo. Esses resultados são coincidentes com os reportados por Bucur (2006), que afirma que a velocidade de propagação das ondas é mais afetada pela frequência do transdutor na propagação na direção longitudinal com aumento da velocidade para aumentos de frequência até 500 kHz.

7.4.2 Resultados obtidos por ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova

7.4.2.1 Método do ultra-som

Nessa situação, os ensaios foram conduzidos exclusivamente com o método do ultra-som.

Os valores da velocidade de propagação da onda e da constante dinâmica (C_{LL}), obtidos por mensurações e análises nos corpos-de-prova de flexão longitudinal estão presentes nos Quadros 25 e 26, respectivamente.

Quadro 25 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5613 A	5364 C	5520 AB	5418 BC
Mínimo	5337	5167	5175	5126
Máximo	5840	5499	5783	5747
D.Padrão	152,7	96,5	149,2	176,2
C.V.(%)	2,72	1,80	2,70	3,25

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam velocidades entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 26 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som.

C_{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	22503 A	19374 B	21421 A	22219 A
Mínimo	20517	15868	18634	19203
Máximo	24335	21393	23038	25313
D.Padrão	1131,6	1421,7	1074,5	1882,6
C.V.(%)	5,03	7,34	5,02	8,47

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam constantes dinâmicas entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Pode-se observar, novamente, que os tratamentos com maiores valores de densidade apresentaram maiores constantes dinâmicas (C_{LL}) (tratamentos 1 e 4).

7.4.3 Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova dos painéis

7.4.3.1 Flexão estática longitudinal

Nos Quadros 27 e 28 são apresentados valores obtidos nos corpos-de-prova da resistência à flexão estática longitudinal (Quadro 27) e para o módulo de elasticidade obtido nos corpos-de-prova (Quadro 28).

Quadro 27 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência à flexão estática na direção longitudinal.

$f_{M,1}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	111,87 A	91,96 B	114,97 A	114,95 A
Mínimo	86,81	72,11	91,07	88,92
Máximo	131,30	108,71	134,30	136,97
D.Padrão	11,4	10,7	9,9	13,5
C.V.(%)	10,22	11,67	8,63	11,76

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências à flexão entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 28 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade à flexão estática na direção longitudinal.

$E_{s,l}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	14662 AB	12025 C	15139 A	13969 B
Mínimo	13155	10240	13876	11462
Máximo	16075	13257	16357	16289
D.Padrão	850,0	891,9	670,4	1401,8
C.V.(%)	5,80	7,42	4,43	10,04

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam módulos de elasticidade entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Os coeficientes de variação dos valores de resistência à flexão apresentam-se muito próximos de 10%, revelando a grande homogeneidade de desempenho dos corpos-de-prova dentro de cada tratamento.

Surpreendentemente, o módulo de elasticidade apresentou, de forma sistemática, menores coeficientes de variação. Os tratamentos com maiores coeficientes de variação para essa propriedade foram o tratamento T2 (inferior) e o T4 (alternado). Os outros dois tratamentos apresentaram coeficiente de variação de aproximadamente 5%, valor que revela, de forma marcante, a elevada homogeneidade dentro desses tratamentos.

A disposição das lâminas nos corpos-de-prova para o ensaio de flexão estática foi um fator altamente importante. O tratamento constituído por lâminas com altos valores de módulos de elasticidade nas capas e contracapas, e baixos valores no miolo (T3) apresentou melhor desempenho no ensaio de flexão estática longitudinal, uma vez que a região tracionada possuía apenas lâminas com altos valores de módulos. O tratamentos 1 apresentou valores próximos ao tratamento 3, e conforme poderia ser esperado, o tratamento T2 teve o pior desempenho relativo.

A NBR 7190/97 (item 6.3.3) apresenta relações usuais para valores de resistência da madeira. Estendendo-se essas relações para valores médios, pode-se admitir, na falta de determinação experimental, que a resistência à tração (no ensaio de flexão os corpos-de-prova atingem a ruína por ruptura à tração, usualmente) é da ordem de 9/7 (1/0,77) da resistência à compressão paralela ($f_{c0,m}/f_{t0,m} = 0,77$). Tomando-se o valor médio da resistência à compressão paralela dos pinus tropicais (Anexo E da NBR 7190 - ABNT, 1997) e

realizando-se as transformações apresentadas, tem-se que a resistência média à flexão dos pinus tropicais seria de 50 MPa. Encaminhamento semelhante, conduzido para o módulo de elasticidade à flexão, tomando-se o módulo de elasticidade à flexão equivalente a 85% do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (item 6.3.4 da NBR 7190 - ABNT, 1997) resultaria num valor teórico referencial para os pinus tropicais de 8435 MPa. Assim, os valores médios obtidos para os quatro tratamentos estão acima dos valores referenciais (NBR 7190/97), tanto para a variável resistência à flexão estática como para módulo de elasticidade.

7.4.3.2 Flexão estática transversal

Nos Quadros 29 e 30 estão apresentados os valores obtidos nos ensaios de flexão estática de corpos-de-prova retirados na direção transversal do painel.

Quadro 29 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência à flexão estática na direção transversal.

$f_{M,t}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	4,79 A	4,73 A	5,10 A	4,94 A
Mínimo	3,76	3,49	4,32	4,44
Máximo	5,64	6,28	6,27	6,14
D.Padrão	0,6	0,7	0,5	0,5
C.V.(%)	13,63	14,34	10,21	9,26

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências à flexão entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 30 – Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade à flexão estática na direção transversal.

$E_{s,t}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	707 B	660 B	783 A	784 A
Mínimo	545	554	604	638
Máximo	891	767	912	879
D.Padrão	85,7	54,5	89,3	57,9
C.V.(%)	12,11	8,26	11,40	7,39

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam módulos de elasticidade entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

As Figuras 25 e 26 ilustram as variações da densidade aparente, resistência à flexão e módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão estática nas direções longitudinal e transversal, para os quatro tratamentos estudados.

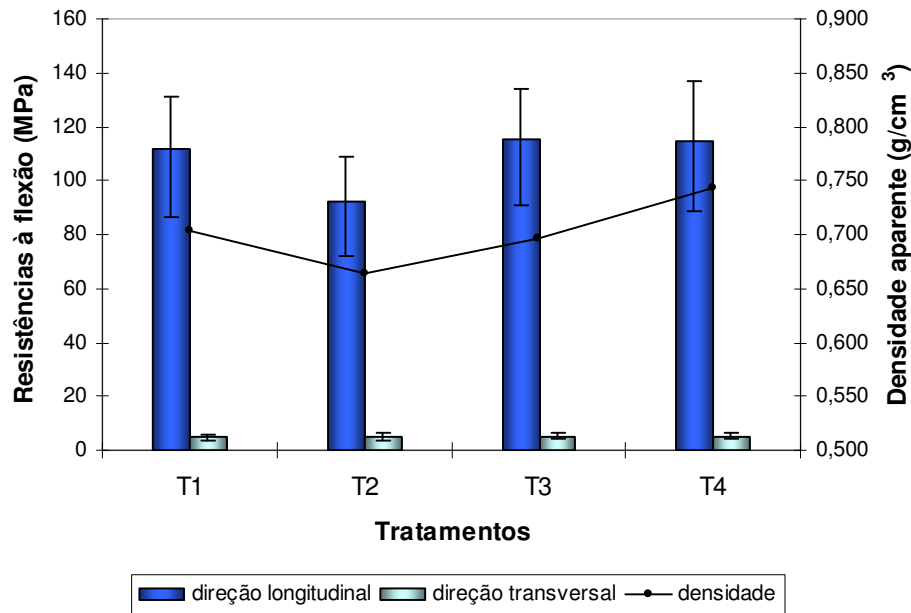


Figura 25 - Painel 13 - Variações da densidade aparente e da resistência à flexão dos quatro tratamentos, nas direções longitudinal e transversal.

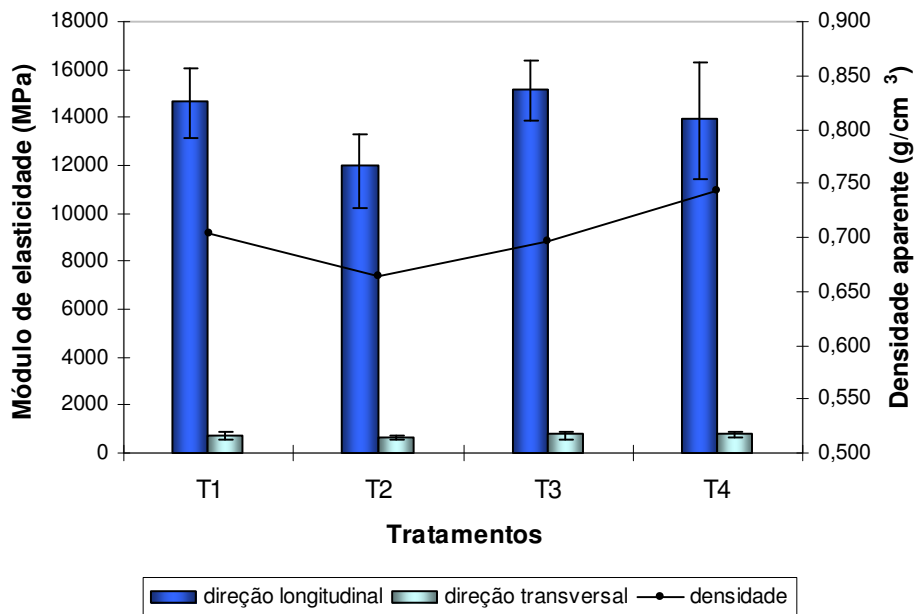


Figura 26 - Painel 13 - Variações da densidade aparente e do módulo de elasticidade dos quatro tratamentos, nas direções longitudinal e transversal.

Os tratamentos apresentaram desempenho semelhante entre si, com valores médios próximos, tanto para a variável resistência à flexão quanto para a variável módulo de elasticidade.

As relações entre as rigidezes médias nas direções longitudinal e transversal foram da ordem de 20. As relações entre as resistências para estes ensaios também apresentaram valores próximos a 20.

Considerando-se que nos painéis LVL não há compensação das propriedades nas direções longitudinal e transversal (como ocorre usualmente nos painéis compensados) a relação obtida para as rigidezes foi semelhante ao referencial teórico da madeira sólida (item 6.3.4 da NBR 7190 - ABNT, 1977).

Relativamente às relações de resistências, a norma brasileira não apresenta valores referenciais para a resistência à tração normal. Contudo, admite-se que essa resistência é pequena (desprezível para efeitos estruturais pela norma). Portanto, a relação f_M/f_{Mt} próxima de 20 é razoável.

7.4.3.3 Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento

Os Quadros 31 a 33 apresentam os valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e da porcentagem da área de ruptura na madeira, para as três condições de ensaio (seco, após umedecimento em água fria e após umedecimento em água quente).

Quadro 31– Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento na condição seca.

	Tratamento							
	T1 superior		T2 inferior		T3 racional		T4 alternado	
	$t_{r,s}$ (MPa)	FM_s (%)	$t_{r,s}$ (MPa)	FM_s (%)	$t_{r,s}$ (MPa)	FM_s (%)	$t_{r,s}$ (MPa)	FM_s (%)
Médio	5,65 B	100 a	5,20 B	99 a	5,07 B	100 a	6,70 A	100 a
Mínimo	3,83	100	4,18	90	3,21	100	4,65	100
Máximo	7,10	100	8,09	100	6,62	100	8,49	100
D.Padrão	0,8	0,0	0,965	2,4	1,0	0,0	0,9	0,0
C.V.(%)	14,93	0,00	18,55	2,37	20,80	0,00	14,10	0,00

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências entre tratamentos e letras minúsculas comparam porcentagens de falhas na madeira entre tratamentos;
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Quadro 32– Corpos-de-prova – Pannel de 13 lâminas – Valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e porcentagem de falha na madeira após umedecimento em água fria.

	Tratamento							
	T1 superior		T2 inferior		T3 racional		T4 alternado	
	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)
Médio	4,35 A	92,78 a	3,48 B	86,11 ab	3,55 B	92,78 a	4,33 A	81,11 b
Mínimo	2,96	70	1,96	50	2,51	70	3,45	40
Máximo	5,32	100	4,61	100	4,70	100	5,14	100
D.Padrão	0,7	8,9	0,7	10,9	0,6	8,3	0,6	16,8
C.V.(%)	16,75	9,64	21,04	12,68	16,42	8,91	13,34	20,67

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências entre tratamentos e letras minúsculas comparam porcentagens de falhas na madeira entre tratamentos;
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 33– Corpos-de-prova – Pannel de 13 lâminas – Valores de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e porcentagem de falha na madeira após umedecimento em água quente (estado de fervura).

	Tratamento							
	T1 superior		T2 inferior		T3 racional		T4 alternado	
	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)	t _{r,s} (MPa)	FM _s (%)
Médio	3,73 A	78,33 a	3,14 B	75,00 ab	3,17 B	73,33 ab	3,95 A	59,44 b
Mínimo	2,69	40	2,34	40	2,44	20	2,81	20
Máximo	4,96	90	3,96	100	4,19	90	4,94	100
D.Padrão	0,5	14,6	0,5	19,5	0,5	20,6	0,5	22,1
C.V.(%)	14,77	18,71	15,17	25,97	15,75	28,06	13,42	37,16

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências entre tratamentos e letras minúsculas comparam porcentagens de falhas na madeira entre tratamentos;
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Analisando os resultados entre os tratamentos no Quadro 31 observa-se igualdade estatística para a resistência da linha de colagem na condição seca entre os tratamentos T1, T2 e T3 e diferença estatística entre estes e o tratamento T4, que apresentou valores médios de resistência da linha de cola superiores.

Este resultado é coerente para o caso dos tratamentos T2 e T3, pois a linha de cola exposta ao esforço de cisalhamento durante o ensaio sempre foi a mais interna, cujas lâminas de ambos os tratamentos são da mesma qualidade (baixo módulo de elasticidade).

O desempenho superior das colagens dos tratamentos T1 e T4, em relação ao T2 e T3, pode ter ocorrido pela utilização de lâminas de melhor qualidade (lâminas com maior porcentagem de altos valores de módulo de elasticidade) na composição dos painéis. Valores baixos de módulo de elasticidade das lâminas podem estar relacionados à presença de defeitos (ex. fendas de laminação) e a densidades mais baixas das lâminas, que prejudicam o desempenho da colagem. Quanto menor é a densidade da lâmina, maior é a porosidade, o que implica em uma maior penetração do adesivo na madeira, induzindo a formação de uma linha de cola de menor resistência.

Este mesmo comportamento foi observado na resistência da colagem ao esforço de cisalhamento nas condições úmida e pós-fervura (Quadro 32 e 33). Nestas condições (úmida e pós-fervura) observa-se também igualdade estatística para a resistência da linha de colagem entre os tratamentos T1 e T4 que tem desempenho superior ao observado nos tratamentos T2 e T3, iguais entre si em desempenho.

De acordo com o Projeto 31:000.05-001/3 - Painéis de Madeira Compensada, o ensaio de resistência da linha de colagem ao esforço de cisalhamento tem como finalidade avaliar a qualidade da linha de colagem e classificar os painéis quanto ao local de utilização. Assim, a norma define três tipos básicos: painel para uso interior – IR (avaliado no ensaio em condição seca), para uso intermediário – IM (avaliado no ensaio em condição úmida) e para uso exterior – EX (avaliado no ensaio em condição pós-fervura). Para isto, os valores médios da resistência da linha de colagem ao esforço de cisalhamento e da falha na madeira devem atender aos requisitos especificados no Quadro 34, conforme orientação da norma EN 314-2: (1993).

Quadro 34 - Requisitos de colagem (valores médios).

Tensão de ruptura ao cisalhamento - $t_{r,s}$ (kgf/cm ²)	Falha na madeira (%)
$2,0 \leq t_{r,s} < 4,1$	≥ 80
$4,1 \leq t_{r,s} < 6,1$	≥ 60
$6,1 \leq t_{r,s} < 10,2$	≥ 40
$t_{r,s} \geq 10,2$	Sem exigência

Fonte: Projeto 31:000.05-001/2

De acordo com os valores médios de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e porcentagem de falha na madeira, apresentados nos Quadros 31, 32 e 33,

observa-se que os painéis LVL, nos quatro tratamentos, atendem aos requisitos estabelecidos nas três condições de ensaio.

Assim, estes painéis podem ser classificados para uso interno, intermediário ou externo.

7.5 Propriedades físicas dos painéis LVL de 25 lâminas

7.5.1 Resultados obtidos nos painéis

7.5.1.1 Densidade aparente

Quadro 35 apresenta os valores médios da densidade aparente dos painéis LVL de 25 lâminas.

Quadro 35 - Paineis de 25 lâminas – Valores de densidade aparente.

Densidade aparente (g/cm ³)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	0,729	0,640	0,644	0,697
Mínimo	0,718	0,611	0,608	0,685
Máximo	0,747	0,667	0,680	0,713
D.Padrão	0,02	0,03	0,04	0,02
C.V.(%)	2,15	4,37	5,59	2,06

Comparando os resultados de densidade dos painéis nos quatro tratamentos, aos valores médios da densidade aparente da madeira sólida dos pinus tropicais (*P. caribae* var. *caribae*, *P. caribae* var. *bahamensis*, *P. caribae* var. *hondurensis* e *P. oocarpa*) a 12% de umidade, reportada pela NBR 7190 (ABNT,1997) de 0,547 g/cm³ e também aos valores médios de densidade das lâminas (0,617 g/cm³), indicados no Quadro 11, observa-se que todos os painéis ultrapassaram esses valores. Este comportamento foi semelhante ao observado nos painéis LVL de 13 lâminas, conforme já explicado no item 5.3.1. Os valores de densidade aparente nos painéis foram obtidos a um teor de umidade de 9.92%. A literatura estudada relata, em geral, um aumento da densidade na madeira com o aumento do teor de umidade. Conclui-se, portanto, que os valores obtidos para os painéis aumentariam ainda mais, a um teor de umidade de 12%, sendo ainda maiores do que o valor médio encontrado para os pinus tropicais, de acordo com a NBR 7190 (ABNT,1997) .

A densidade aparente maior dos tratamentos T1 e T4, em relação ao T2 e T3 pode ter ocorrido pela utilização de lâminas de melhor qualidade (lâminas com maior porcentagem de altos valores de módulo de elasticidade) na composição dos painéis. Isto pode ser atribuído também à influência da densidade que apresenta a própria madeira das lâminas de altos valores de módulo de elasticidade utilizadas nestas composições. Alto valor de módulo de elasticidade pode estar associado também com alta densidade.

Os valores de coeficiente de variação foram baixos, para todos os tratamentos, indicando homogeneidade dos painéis.

Os valores obtidos para os painéis de 25 lâminas são muito próximo aos obtidos nos ensaios de densidade aparente para os painéis de 13 lâminas.

Os valores de coeficiente de variação foram extremamente baixos, principalmente para todos os tratamentos, indicando uma homogeneidade dos painéis.

Conforme já explicado no item 5.3.1, os valores obtidos no ensaio ultrapassam o valor referencial para os pinus tropicais, que é de 0,547 g/cm³ (NBR 7190 - ABNT,1997), devido à densificação do material durante a prensagem. Esses valores também foram superiores aos valores médios de densidade aparente das lâminas originais.

O tratamento 1 apresentou os valores mais altos de densidade, enquanto que o tratamento 2, seguido do tratamento 3, apresentaram os valores mais baixos.

7.5.2 Resultados obtidos nos corpos-de-prova

7.5.2.1 Teor de umidade

Os valores médios do teor de umidade dos corpos-de-prova encontram-se no Quadro 36.

Quadro 36 - Corpos-de-prova - Paineis de 25 lâminas – Valores de umidade.

Umidade (%)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	9,76	9,72	10,21	9,99
Mínimo	8,53	8,96	9,54	9,12
Máximo	10,28	10,54	10,71	10,73
D.Padrão	0,3	0,3	0,3	0,4
C.V.(%)	3,17	3,19	2,68	3,55

O teor de umidade dos painéis nos quatro tratamentos foi praticamente uniforme, sendo em média de 9,92% com baixos coeficientes de variação.

Este comportamento dos corpos-de-prova de não alcançarem a umidade de equilíbrio de 12% nas condições de climatização recomendados pelas normas segundo Kollmann et al (1975), é influenciado pela linha de cola, devido à resina, depois de curada, não permitir adsorção de água no caso de colas fenólicas. Por outro lado, a aplicação de altas temperaturas na secagem das lâminas e na prensagem no processo de fabricação dos painéis reduz a capacidade de sorção da madeira. As inter-relações são complicadas, devido a uma fina capilaridade (sub-microscópica) no sistema madeira-linha de cola e lâmina.

Segundo este autor, o teor de umidade em diferentes painéis laminados (densidade entre 0,430 g/cm³ e 0,794 g/cm³), depois da armazenagem em um clima normal (umidade relativa de 65% ± 2% e temperatura de 20°C ± 1°C), variou entre 7,3% e 12,7%, sendo 10% o seu valor médio.

Os valores obtidos são muito semelhantes entre os quatro tratamentos, apresentando uma baixa variação. O coeficiente de variação foi baixo para todos os tratamentos.

O tratamento 3 (racional) apresentou o valor médio mais alto nessa propriedade.

7.5.2.2 Densidade aparente

O Quadro 37 apresenta os resultados das mensurações de densidade aparente para os corpos-de-prova dos painéis de 25 lâminas.

Quadro 37 - Corpos-de-prova - Paineis de 25 lâminas – Valores de densidade aparente.

Valores	Tratamento							
	1		2		3		4	
	flatwise	edgewise	flatwise	edgewise	flatwise	edgewise	flatwise	edgewise
Mínimo	0,722	0,719	0,615	0,617	0,607	0,613	0,683	0,693
Máximo	0,781	0,768	0,682	0,688	0,709	0,695	0,728	0,731
Médio	0,740	0,742	0,651	0,656	0,652	0,652	0,702	0,708
D.Padrão	0,014	0,016	0,022	0,024	0,032	0,025	0,014	0,011
C.V.(%)	1,91	2,10	3,34	3,62	4,91	3,91	2,00	1,60

O tratamento 1 apresentou os maiores valores de densidade nos dois eixos principais (*flatwise* e *edgewise*).

Os coeficientes de variação mostraram-se baixos para todos os tratamentos.

A fim de se buscar uma avaliação de igualdade estatística, foi realizado um teste de comparação de médias entre os valores obtidos nos corpos-de-prova para o ensaio de flexão no eixo de menor inércia (*flatwise*) em relação aos valores obtidos nos corpos-de-prova de flexão no eixo de maior inércia (*edgewise*). O resultado do teste mostrou que não há diferença significativa entre esses valores, e também não há diferença significativa entre esses valores em relação aos valores de densidade aparente obtidos para os painéis originais.

7.6 Propriedades mecânicas dos painéis LVL de 25 lâminas

7.6.1 Resultados obtidos por ensaios não-destrutivos nos painéis

7.6.1.1 Método das ondas de tensão

Nos Quadros 38 a 41 são apresentados os valores de velocidade de propagação da onda e módulo de elasticidade dinâmico (E_d) obtidos nos ensaios de ondas de tensão nas direções longitudinal e transversal dos painéis de 25 lâminas.

Quadro 38 - Paineis de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do painel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5441	4720	4945	5308
Mínimo	5357	4344	4854	5257
Máximo	5597	5357	5047	5380
D.Padrão	102,7	326,4	78,1	36,3
C.V.(%)	1,89	6,92	1,58	0,68

Quadro 39 - Pannel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão na direção longitudinal do pannel.

E_d (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	21593	14279	15759	19652
Mínimo	20589	12118	14334	18928
Máximo	22653	17536	17278	20202
D.Padrão	824,6	1691,8	1163,6	521,9
C.V.(%)	3,82	11,85	7,38	2,66

Quadro 40 - Pannel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ondas de tensão na direção transversal do pannel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1525	1413	1440	1435
Mínimo	1486	1369	1397	1405
Máximo	1596	1432	1486	1456
D.Padrão	52,5	30,1	34,9	19,0
C.V.(%)	3,44	2,13	2,43	1,32

Quadro 41 - Pannel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão na direção transversal do pannel.

E_d (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1700	1293	1336	1436
Mínimo	1585	1145	1188	1353
Máximo	1903	1458	1420	1488
D.Padrão	151,9	107,4	90,8	55,7
C.V.(%)	8,94	8,31	6,80	3,88

Tanto para os ensaios realizados na direção longitudinal como para os realizados na direção transversal do pannel, o tratamento 1 obteve os valores médios mais altos, nas duas variáveis analisadas (velocidade de propagação da onda e módulo de elasticidade dinâmico). O tratamento 2 foi o que apresentou menores valores, para ambos os ensaios.

Os coeficientes de variação mostraram-se baixos para todos os tratamentos, principalmente para os tratamentos 1 e 4, os quais apresentaram os valores médios mais altos na variável módulo de elasticidade dinâmico (E_d), para os ensaios realizados na direção longitudinal e para os realizados na direção transversal do pannel.

Esses tratamentos apresentaram desempenho semelhante para essas medições nos ensaios realizados nos painéis de 13 lâminas.

7.6.1.2 Método do ultra-som

Os valores de velocidades de propagação da onda e constantes dinâmicas (C_{LL}) dos ensaios de ultra-som dos painéis estão expressos nos Quadros 42 e 43 para os ensaios realizados na direção longitudinal, e nos Quadros 44 e 45, para aqueles realizados na direção transversal do painel, respectivamente.

Quadro 42 - Painel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som na direção longitudinal do painel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5744	5047	5185	5579
Mínimo	5622	4660	4937	5394
Máximo	5921	5570	5438	5681
D.Padrão	109,0	358,7	164,1	87,1
C.V.(%)	1,90	7,11	3,17	1,56

Quadro 43 - Painel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som na direção longitudinal do painel.

C_{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	24062	16328	17365	21713
Mínimo	23025	13947	14826	19930
Máximo	25350	18959	20119	22865
D.Padrão	853,2	1978,2	1898,8	954,7
C.V.(%)	3,55	12,12	10,93	4,40

Quadro 44 - Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ultra-som na direção transversal do painel.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1420	1483	1480	1449
Mínimo	1321	1419	1445	1410
Máximo	1489	1550	1522	1498
D.Padrão	75,0	52,7	33,9	34,7
C.V.(%)	5,28	3,55	2,29	2,40

Quadro 45 - Pannel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som na direção transversal do pannel.

C_{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	1474	1413	1401	1461
Mínimo	1303	1230	1271	1361
Máximo	1591	1602	1490	1556
D.Padrão	127,8	150,9	99,9	83,1
C.V.(%)	8,68	10,68	7,13	5,69

Em relação à constante dinâmica (C_{LL}), o tratamento 1 apresentou melhores valores médios, para as duas direções do ensaio. O tratamento 1 apresentou ainda, para a variável velocidade de propagação de onda, valor médio mais alto para a direção longitudinal de ensaio. O tratamento 4 também apresentou um bom desempenho, com valor médio de C_{LL} na direção transversal muito próximo ao tratamento 1.

Os coeficientes de variação mostraram-se baixos para essas variáveis, principalmente para a variável velocidade de propagação.

7.6.2 Ensaio não-destrutivos nos corpos-de-prova

7.6.2.1 Método das ondas de tensão

Os Quadros 46 a 49 resumem os valores de velocidade de propagação da onda e módulo de elasticidade (E_d) obtidos por ensaios de ondas de tensão realizados em corpos-de-prova destinados ao ensaio de flexão estática no eixo de menor inércia (*flatwise*) e no eixo de maior inércia (*edgewise*).

Quadro 46 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática *flatwise*.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5158 A	4470 C	4746 B	5113 A
Mínimo	4914	4147	4610	4954
Máximo	5345	4847	5047	5345
D.Padrão	113,672	224,963	112,770	84,796
C.V.(%)	2,20	5,03	2,38	1,66

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam velocidades da onda entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Quadro 47 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores do módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática *flatwise*.

Ed (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	19681 A	13030 D	14715 C	18348 B
Mínimo	17910	11216	13289	16871
Máximo	21187	14944	17304	19690
D.Padrão	799,858	1163,444	1241,890	656,779
C.V.(%)	4,06	8,93	8,44	3,58

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam módulos de elasticidade entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 48 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática *edgewise*.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5348 A	4596 C	4848 B	5267 A
Mínimo	5209	4205	4470	5097
Máximo	5521	5256	5392	5493
D.Padrão	101,9	300,8	235,0	101,5
C.V.(%)	1,91	6,54	4,85	1,93

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam velocidades da onda entre tratamentos;
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ($p<0,05$).

Quadro 49 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores do módulo de elasticidade obtidos pelo método de ondas de tensão em c.p.de flexão estática *edgewise*.

Ed (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	21213 A	13865 D	15408 C	19653 B
Mínimo	19819	11587	12254	18072
Máximo	22513	17268	19665	21078
D.Padrão	669,5	1537,3	2026,4	886,8
C.V.(%)	3,16	11,09	13,15	4,51

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam módulos de elasticidade entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Para esse ensaio, tanto para corpos-de-prova destinados ao ensaio de flexão estática no eixo de menor inércia (*flatwise*) como nos corpos-de-prova para flexão no

eixo de maior inércia (*edgewise*), os tratamentos 1 e 4 obtiveram valores mais altos, tanto na velocidade de propagação da onda, como de módulo de elasticidade dinâmico, e os tratamentos 3 e 4 obtiveram valores de E_d bem abaixo dos demais.

Os coeficientes de variação mostram-se extremamente baixos, principalmente para a variável velocidade de propagação da onda.

Os quatro tratamentos obtiveram desempenhos distintos entre si; apenas os tratamentos 1 e 4 apresentaram desempenhos semelhantes.

Comparando-se os dois tipos de ensaios (nos eixos de menor e maior inércia), pode-se notar que os corpos-de-prova para o ensaio de flexão estática no eixo de maior inércia (*edgewise*) obtiveram valores de módulo de elasticidade superiores aos corpos-de-prova no eixo de menor inércia.

7.6.2.2 Método do ultra-som

Os Quadros 50 a 53 reportam os valores de velocidade de propagação de ondas e constante dinâmica (C_{LL}), nos corpos-de-prova destinados ao ensaio de flexão estática no eixo de menor inércia (*flatwise*) e no eixo de maior inércia (*edgewise*).

Quadro 50 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores da velocidade da onda pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática *flatwise*.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5701 A	4899 D	5135 C	5522 B
Mínimo	5518	4512	4953	5395
Máximo	5908	5292	5361	5680
D.Padrão	132,4	254,8	114,4	70,1
C.V.(%)	2,32	5,20	2,23	1,27

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam velocidades da onda entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 51 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática *flatwise*.

C _{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	24049 A	15654 D	17227 C	21401 B
Mínimo	22229	13279	14929	20154
Máximo	25835	17613	19520	22857
D.Padrão	1154,4	1484,8	1428,1	755,7
C.V.(%)	4,80	9,49	8,29	3,53

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam constantes dinâmicas entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 52 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores de velocidade da onda pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática *edgewise*.

Velocidade (m/s)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	5603 A	4784 D	5040 C	5451 B
Mínimo	5486	4417	4788	5348
Máximo	5756	5064	5302	5519
D.Padrão	93,1	232,1	171,7	52,1
C.V.(%)	1,66	4,85	3,41	0,96

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam velocidades da onda entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 53 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores da constante dinâmica obtidos pelo método de ultra-som em c.p.de flexão estática *edgewise*.

C _{LL} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	23284 A	15011 D	16627 C	21046 B
Mínimo	22272	12786	14275	20030
Máximo	24444	16392	19223	22270
D.Padrão	631,9	1256,9	1756,8	665,1
C.V.(%)	2,71	8,37	10,57	3,16

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam constantes dinâmica entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

No ensaio de ultra-som observam-se os mesmos comportamentos dos tratamentos 1 e 4 nos ensaios de ondas de tensão. Assim como no método das ondas de tensão,

nos ensaios de ultra-som, esses tratamentos foram os que apresentaram maiores valores médios, tanto na variável velocidade de propagação da onda como na variável constante dinâmica (C_{LL}). Os valores de coeficiente de variação obtidos para os quatro tratamentos apresentaram-se baixos para as duas variáveis analisadas, ficando a menos que 1%, para o tratamento 4 na variável velocidade de propagação da onda (Quadro 52).

Nota-se que, os valores de módulo de elasticidade mensurados pelo método do ultra-som são superiores aos mensurados pelo método das ondas de tensão, para os mesmos corpos-de-prova.

7.6.3 Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova dos painéis

7.6.3.1 Flexão estática na condição de menor inércia (*flatwise*)

Os Quadros 54 e 55 resumem os valores obtidos de valores de resistência à flexão estática e módulo de elasticidade, no ensaio de flexão estática no eixo de menor inércia.

Quadro 54 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de resistência à flexão estática dos c.p. *flatwise*.

$f_{Ms,f}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	114,52 A	80,55 C	93,41 B	96,71 B
Mínimo	97,70	66,38	82,92	81,55
Máximo	133,91	92,74	104,51	111,46
D.Padrão	9,9	7,9	6,5	9,3
C.V.(%)	8,68	9,82	7,01	9,60

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências à flexão entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 55- Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dos c.p. *flatwise* submetidos à flexão estática.

$E_{s,f}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	14555 A	10745 C	13512 B	14042 AB
Mínimo	13414	9365	12667	13326
Máximo	16186	12599	14507	15166
D.Padrão	620,6	1021,0	586,8	442,4
C.V.(%)	4,26	9,50	4,34	3,15

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam módulos de elasticidade entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

As figuras 27 e 28 apresentam as linhas de tendência de variação da densidade aparente média dos tratamentos da resistência à flexão e do módulo de elasticidade nas duas posições de ensaio (maior e menor inércia) para os quatro tratamentos estudados.

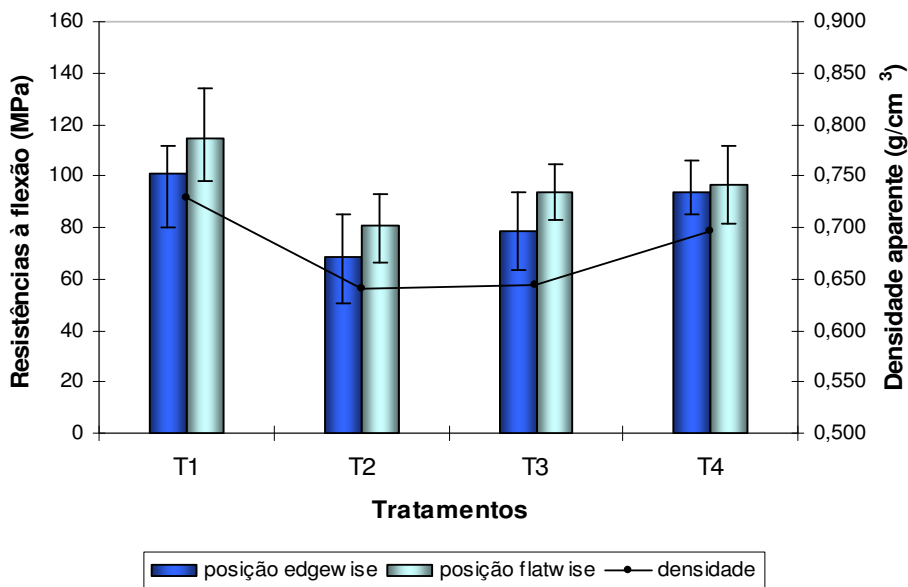


Figura 27 - Painel 25 - Variações da densidade aparente e da resistência à flexão dos quatro tratamentos, nas posições de maior e de menor inércia.

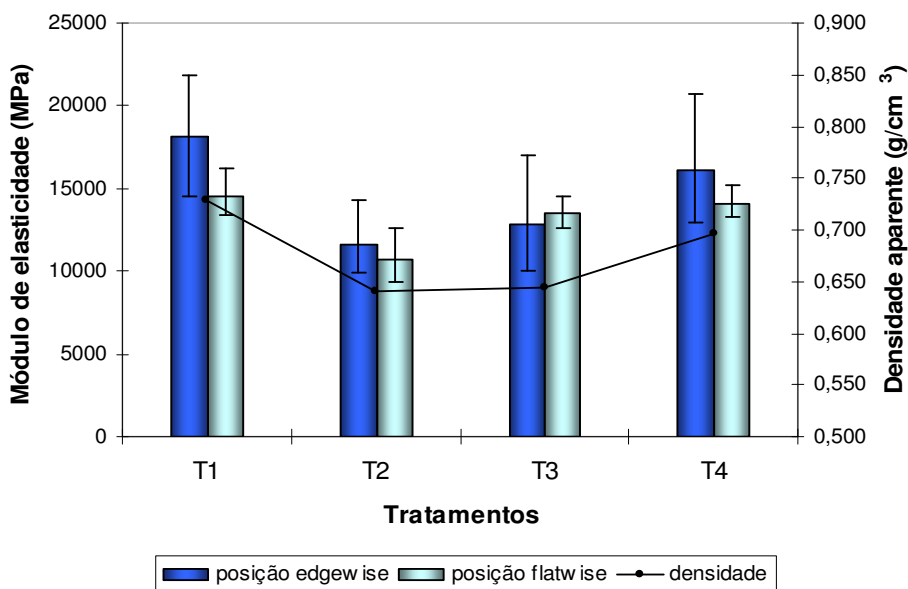


Figura 28 - Painel 25 - Variações da densidade aparente e do módulo de elasticidade dos quatro tratamentos, nas posições de maior e de menor inércia.

Como se podia esperar, o tratamento 1 obteve os melhores valores médios de resistência e de módulo de elasticidade, e o tratamento 2, obteve os menores valores. Os coeficientes de variação apresentaram-se baixos, confirmando a homogeneidade dos painéis LVL.

Os valores médios apresentados foram obtidos a uma umidade a 9,92%. As correções dos valores obtidos para resistência e rigidez para umidade de equilíbrio da madeira a 12% foram realizadas de acordo com as expressões do item 6.2.1 da NBR 7190 (ABNT, 1997). Os valores médios de resistência à flexão estática, no eixo de menor inércia corrigidos a umidade de 12% são: 107,42 MPa, 75,56 MPa, 87,62 MPa e 90,71 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Os valores de módulo de elasticidade corrigidos para essa mesma umidade são: 13944 MPa, 10294 MPa, 12944 MPa e 13452 MPa para T1, T2, T3 e T4. Comparando-se os valores obtidos nos ensaios com os valores do Quadro 4, observa-se um excelente desempenho dos corpos-de-prova produzidos a partir de painéis LVL. Na condição de menor inércia (*flatwise*), o tratamento T2 obteve menor valor médio, alcançando 10745 MPa, e ultrapassando o valor de referência.

Comparando-se os valores obtidos de módulo de elasticidade à flexão estática com os valores para as cinco classes de LVL do Quadro 2, observa-se o ótimo desempenho dos quatro tratamentos estudados. Todos os tratamentos possuem valores compatíveis com as cinco classes de resistência da APA EWS.

Os valores característicos da resistência à flexão na condição de menor inércia foram obtidos através da expressão para estimativa de valor característico do item 6.4.8 da NBR 7190 (ABNT, 1997). Para a resistência à flexão na condição de menor inércia, os valores característicos obtidos são, para T1, T2, T3 e T4, respectivamente: 105,5 MPa; 75,85 MPa, 90,93 MPa e 88,46 MPa. Quando corrigidos a umidade de 12%, os valores característicos obtidos são: 99,03 MPa, 71,15 MPa, 85,29 MPa e 82,97 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente.

Os valores característicos da resistência à flexão estática e os módulos de elasticidade dos quatro tratamentos podem ser comparados com valores de LVL produzidos a partir de lâminas de *Pinus radiata*, pela indústria Nelson Pine da Nova Zelândia (Quadro 56).

Também os valores médios da pesquisa da resistência à flexão estática e os módulos de elasticidade dos quatro tratamentos podem ser comparados com valores de LVL fabricados com madeira de *Southern pine* e *Douglas fir* (Quadro 57).

Quadro 56 - Valores característicos (MPa) de algumas resistências mecânicas e módulo de elasticidade estático para LVL produzidos pela Nelson Pine.

Tratamento	Ensaio	Parâmetro	Nelson Pine*	Pesquisa **
1	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	10340	13944
		f_M	38,00	99,03
	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	10340	17382
		f_M	38,00	92,94
Compressão paralela	$f_{c,0}$	35,0	63,51	
	Cisalhamento longitudinal	f_v	4,8	7,87
2	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	10340	10294
		f_M	38,00	71,15
	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	10340	11070
		f_M	38,00	47,80
Compressão paralela	$f_{c,0}$	35,0	43,36	
	Cisalhamento longitudinal	f_v	4,8	8,76
3	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	10340	12944
		f_M	38,00	85,29
	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	10340	12323
		f_M	38,00	68,09
Compressão paralela	$f_{c,0}$	35,0	43,53	
	Cisalhamento longitudinal	f_v	4,8	7,44
4	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	10340	13452
		f_M	38,00	82,97
	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	10340	15445
		f_M	38,00	87,12
Compressão paralela	$f_{c,0}$	35,0	56,98	
	Cisalhamento longitudinal	f_v	4,8	6,93

*LVL confeccionados a partir de lâminas de *Pinus radiata*.

** Valores corrigidos para teor de umidade de equilíbrio da madeira a 12%.

Fonte: Nelson Pine Laminated Veneer Lumber LVL (2003).

Os valores obtidos de resistência à flexão e módulo de elasticidade nos ensaios são superiores aos apresentados no Quadro para os quatro tratamentos.

Quadro 57- Valores médios (MPa) de resistência à flexão estática nas condições de maior e menor inércia (*flatwise* e *edgewise*) e módulo de elasticidade para LVL de 2x4”, confeccionados a partir de lâminas de madeira juvenil (MJ) e adulta (MA) de Southern Pine e Douglas-fir.

Trat.	Ensaio	Param.	Literatura - USA				Pesquisa*
			Southern Pine		Douglas-fir		
			MA	MJ	MA	MJ	
1	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	13652	9239	12825	8963	17382
		f_M	70,26	51,92	67,91	37,92	94,82
	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	13032	8757	13652	8963	13944
		f_M	66,54	47,85	61,57	33,78	107,42
2	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	13652	9239	12825	8963	11070
		f_M	70,26	51,92	67,91	37,92	64,01
	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	13032	8757	13652	8963	10294
		f_M	66,54	47,85	61,57	33,78	75,56
3	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	13652	9239	12825	8963	12323
		f_M	70,26	51,92	67,91	37,92	73,55
	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	13032	8757	13652	8963	12944
		f_M	66,54	47,85	61,57	33,78	87,62
4	Flexão <i>edgewise</i>	E_d	13652	9239	12825	8963	15445
		f_M	70,26	51,92	67,91	37,92	87,79
	Flexão <i>flatwise</i>	E_d	13032	8757	13652	8963	13452
		f_M	66,54	47,85	61,57	33,78	90,71

* Valores corrigidos para teor de umidade de equilíbrio da madeira a 12%.

Fonte: Kretschmann et al. (1993).

Os corpos-de-prova a partir de LVL estudados dos tratamentos 1 e 4 , quando comparados com valores do Quadro 57, obtiveram maiores valores de módulo de elasticidade e de resistência à flexão em relação à madeiras juvenil e adulta das duas espécies de referência (*Southern pine* e *Douglas-fir*).

Os tratamentos 2 e 3 obtiveram maiores valores de resistência, mas menores valores de módulos de elasticidade em relação à madeira adulta das duas espécies.

7.6.3.2 - Flexão estática na condição de maior inércia (*edgewise*)

Os Quadros 58 e 59 resumem os valores obtidos de valores de resistência à flexão estática e módulo de elasticidade, no ensaio de flexão estática no eixo de maior inércia (*edgewise*).

Quadro 58 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores de resistência à flexão estática dos c.p. *edgewise*.

$f_{Ms,e}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	101,08 A	68,24 D	78,41 C	93,60 B
Mínimo	79,85	50,68	63,38	85,36
Máximo	112,00	85,17	93,58	105,91
D.Padrão	7,2	10,7	8,9	5,8
C.V.(%)	7,17	15,67	11,42	6,21

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências à flexão entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Quadro 59 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dos c.p. *edgewise* submetidos à flexão estática.

$E_{s,e}$ (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	18144 A	11555 C	12863 C	16122 B
Mínimo	14529	9916	10027	12978
Máximo	21854	14247	17044	20755
D.Padrão	2310,8	1368,1	2107,6	1935,2
C.V.(%)	12,74	11,84	16,39	12,00

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam módulos de elasticidade entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Novamente, os tratamentos T1 e T4 obtiveram as maiores médias para a resistência à flexão estática e para o módulo de elasticidade para os corpos-de-prova no eixo de maior inércia.

Apenas os tratamentos T3 e T4 apresentaram valores médios de resistência superiores aos valores de resistência obtidos nos ensaios em corpos-de-prova no eixo de menor inércia (*flatwise*). Já para a variável módulo de elasticidade, apenas o

tratamento 3 alcançou valores inferiores àqueles ensaiados no eixo de menor inércia; os demais tratamentos obtiveram valores de módulo de elasticidade superiores.

O coeficiente de variação foi maior para essa condição de ensaio do que na condição de menor inércia, mas manteve-se dentro dos valores aceitáveis.

Os valores característicos da resistência à flexão na condição de maior inércia foram obtidos através da expressão para estimativa de valor característico, conforme mencionado no item anterior. Para a resistência à flexão na condição de maior inércia, os valores característicos obtidos são 99,08 MPa, 50,96 MPa, 72,59 MPa e 92,87 MPa, respectivamente para os tratamentos T1, T2, T3 e T4. Quando corrigidos a umidade de 12%, os valores característicos obtidos são: 92,94 MPa, 47,80 MPa, 68,09 MPa e 87,12 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Esses valores, quando comparados aos do Quadro 56 evidenciam os bons resultados obtidos pelos quatro tratamentos. Todos os valores encontrados nos tratamentos são superiores aos valores de referência do Quadro, tanto para valores de resistência, como para valores de módulos de elasticidade.

Os valores médios de resistência à flexão estática, no eixo de maior inércia corrigidos a umidade de 12% são: 94,82 MPa, 64,01 MPa, 73,55 MPa e 87,79 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Os valores de módulo de elasticidade corrigidos para essa mesma umidade são: 17382 MPa, 11070 MPa, 12323 MPa e 15445 MPa para T1, T2, T3 e T4. Comparando-se, novamente, os valores obtidos nos ensaios com os valores do Quadro 4, observa-se que os tratamentos possuem maiores valores de módulo de elasticidade e de resistência à flexão em relação ao referencial, confirmando o bom desempenho dos tratamentos.

Em relação aos valores encontrados no Quadro 57, os tratamentos T1 e T4 possuem módulos de elasticidade e resistência à flexão maiores que os referenciais para LVL de Southern pine e Douglas-fir. O tratamento T2 não alcançou valores de módulo de elasticidade e de resistência especificados pelo referido Quadro 57.

7.6.3.3 Cisalhamento longitudinal

No Quadro 60 observam-se os valores de resistência ao cisalhamento, obtidos para os quatro tratamentos estudados.

Quadro 60 - Corpos-de-prova - Pannel de 25 lâminas – Valores de resistência ao cisalhamento longitudinal.

F _{v,0} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	9,86 AB	10,11 A	9,07 BC	8,99 C
Mínimo	7,75	7,90	7,18	5,56
Máximo	11,97	12,24	12,16	11,99
D.Padrão	1,2	1,1	1,2	1,3
C.V.(%)	12,67	10,72	13,26	14,67

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências ao cisalhamento da onda entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$).

O tratamento 2 apresentou os maiores valores de resistência ao cisalhamento longitudinal, e o tratamento 4, os valores mais baixos.

Os tratamentos 1 e 2 não foram significativamente diferentes, assim como os tratamentos 3 e 4. O tratamento 2 apresentou os maiores valores médios de resistência ao cisalhamento longitudinal, pouco superior em relação ao valor médio do tratamento 1; e o tratamento 4, os valores mais baixos.

Os valores médios de resistência ao cisalhamento longitudinal corrigidos a umidade de 12% são: 9,25 MPa, 9,48 MPa, 8,51 MPa e 8,43 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. De acordo com o Quadro 4, pode-se comparar os resultados obtidos com os valores médios de madeiras de coníferas. O valor médio de resistência ao cisalhamento contido no Quadro é 7,6 MPa para os pinus tropicais. Todos os tratamentos apresentaram valores médios superiores ao da madeira sólida.

Os valores de coeficiente de variação encontram-se dentro dos limites considerados bons (<15%).

Para a resistência ao cisalhamento longitudinal, os valores característicos obtidos são, para T1, T2, T3 e T4, respectivamente: 8,39 MPa, 9,34 MPa, 7,93 MPa e 7,39 MPa. Quando corrigidos a umidade de 12%, os valores característicos obtidos são: 7,87 MPa, 8,76 MPa, 7,44 MPa e 6,93 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Comparados aos valores do Quadro 56, nota-se que os valores obtidos em todos os tratamentos são superiores aos valores de referência.

7.6.3.4 Compressão paralela às fibras

Os valores de resistência à compressão paralela às fibras obtidos encontram-se no Quadro 61.

Quadro 61 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de resistência à compressão paralela às fibras.

F _{c,0} (MPa)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	66,05 A	48,19 C	50,59 C	57,82 B
Mínimo	59,88	42,93	43,00	54,91
Máximo	71,38	52,99	61,99	61,18
D.Padrão	3,0	2,9	5,5	1,7
C.V.(%)	4,56	6,09	10,82	2,96

Nota:

- 1) numa mesma linha, letras maiúsculas comparam resistências à compressão entre tratamentos.
- 2) tratamentos com pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$).

O tratamento 1 apresentou maiores médias em relação aos demais, seguido do tratamento 4.

Os tratamentos 2 e 3 não foram significativamente diferentes.

Conforme relatado anteriormente, os valores médios apresentados foram obtidos a uma umidade a 9,92%. Os valores médios de resistência à compressão paralela corrigidos a umidade de 12% são: 61,96 MPa, 45,20 MPa, 47,45 MPa e 54,24 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. De acordo com o Quadro 4, o valor médio de resistência à compressão paralela às fibras para pinus tropicais é em torno de 38,50 MPa. Todos os tratamentos apresentaram valores médios superiores ao da madeira sólida (coníferas).

Os coeficientes de variação mostraram-se baixos, indicando uma grande homogeneidade dos painéis nessa propriedade.

Para a resistência à compressão paralela às fibras, os valores característicos obtidos são, para T1, T2, T3 e T4, respectivamente: 67,71 MPa, 46,22 MPa, 46,40 MPa e 60,75 MPa. Corrigindo-se a umidade de 12%, os valores característicos obtidos são: 63,51 MPa, 43,36 MPa, 43,53 MPa e 56,98 MPa para T1, T2, T3 e T4, respectivamente.

De acordo com o Quadro 56, todos os valores de resistência à compressão paralela dos quatro tratamentos foram superiores aos de referência.

7.6.3.5 Compressão perpendicular às fibras

De acordo com o Quadro 62, o qual resume os resultados dos valores da carga atingida quando a deformação do corpo-de-prova atingiu 2,5 mm na compressão perpendicular às fibras, pode-se observar que não houve grande diferença entre os tratamentos.

Quadro 62 - Corpos-de-prova - Painel de 25 lâminas – Valores de carga atingida quando deformação atinge 2.5 mm na compressão perpendicular às fibras.

Carga máx. (kgf)	Tratamento			
	T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
Médio	4981,9	4279,7	4262,8	4573,1
Mínimo	4562	3483	3567	4270
Máximo	5486	4848	4842	4969
D.Padrão	266,0	363,3	414,1	189,6
C.V.(%)	5,34	8,49	9,71	4,15

O tratamento 1 atingiu os maiores valores de carga, para deformação de 2,5 mm, seguido pelo tratamento 4.

Os tratamentos 2 e 3 apresentaram valores médios semelhantes aos demais, mas apresentaram valores mínimos bem inferiores.

Os valores médios de carga máxima foram semelhantes para os quatro tratamentos.

O tratamento 1 atingiu os maiores valores de carga, para deformação de 2,5 mm, seguido pelo tratamento 4.

Os tratamentos 2 e 3 apresentaram valores médios semelhantes aos demais, mas apresentaram valores mínimos bem inferiores.

7.7 Associações entre as variáveis mensuradas nos ensaios não-destrutivos em painéis e em corpos-de-prova

Os ensaios não-destrutivos foram realizados tanto em painéis quanto em corpos-de-prova deles representativos.

Foram estudadas as associações entre os resultados dos ensaios não-destrutivos obtidos nessas duas situações.

7.7.1 Pannel de 13 lâminas

Na figura 29 são apresentadas as regressões lineares entre as velocidades de propagação das ondas de ultra-som (no painel e média dos corpos-de-prova dele representativos – gráfico à esquerda) e entre as constantes dinâmicas C_{LL} , também avaliadas nessas duas situações distintas (gráfico à direita).

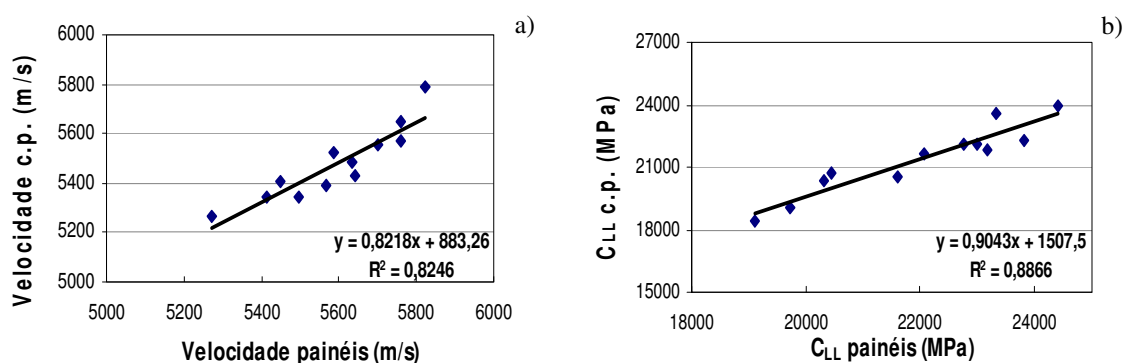


Figura 29 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Pannel de 13 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som no painel e nos corpos-de-prova; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) no painel do nos corpos-de-prova.

Comparando-se os valores obtidos nota-se que, nos dois casos avaliados houve uma boa correlação entre resultados mensurados nessas duas situações, com coeficiente de determinação da regressão (R^2) maiores que 0,82.

7.7.2 Pannel de 25 lâminas

Nas figuras 30 a 33 ilustram-se as regressões lineares obtidas entre resultados de ensaios não-destrutivos (ondas de tensão e ultra-som) quando aplicados nos painéis de 25 lâminas e seus respectivos corpos-de-prova.

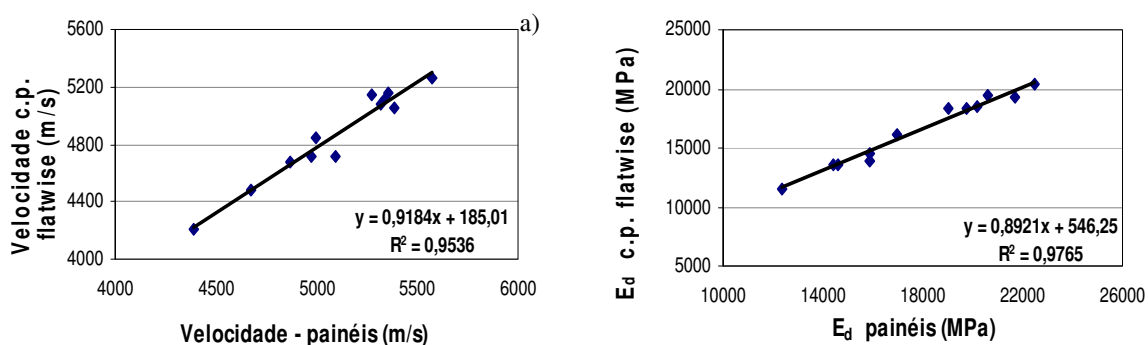


Figura 30 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *flatwise*; b) Regressão linear entre o módulo dinâmico (E_d) no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *flatwise*.

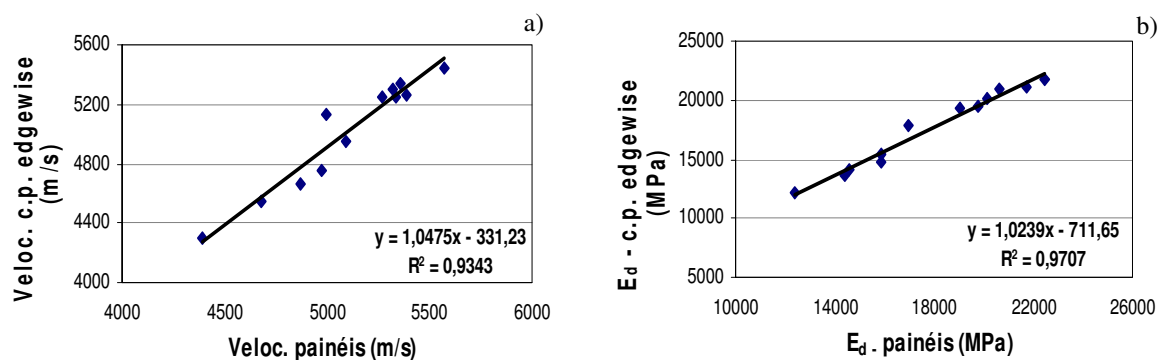


Figura 31 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *edgewise*; b) Regressão linear entre o módulo dinâmico (E_d) no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *edgewise*.

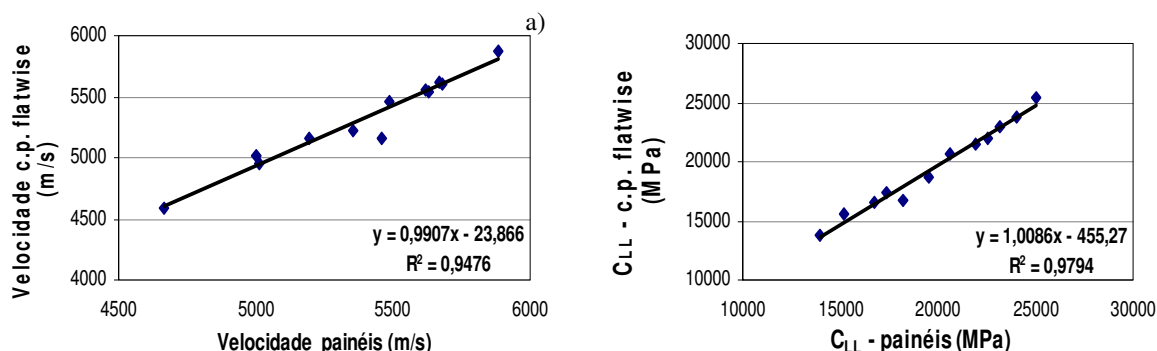


Figura 32 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *flatwise*; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *flatwise*.

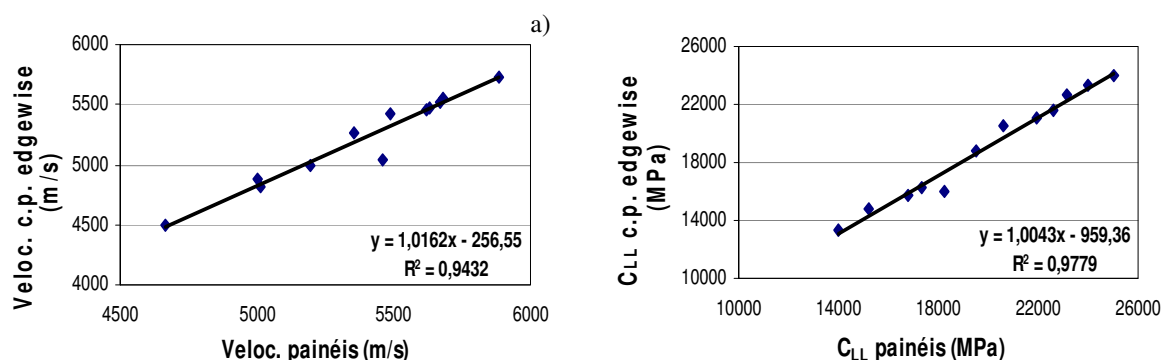


Figura 33 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *edgewise*; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) no painel e nos corpos-de-prova para ensaios *edgewise*.

Os resultados obtidos para painéis de 25 lâminas e respectivos corpos-de-prova *flatwise* e *edgewise*, para os ensaios não-destrutivos de ondas de tensão e ultra-som mostraram, novamente, uma boa correlação ($R^2 > 0,93$) entre os resultados obtidos nessas duas situações.

Dessa forma confirma-se o que já era esperado. As mensurações de variáveis dos ensaios não-destrutivos podem ser feitas diretamente nos painéis, sem a necessidade de produção de corpos-de-prova.

7.8 Associações entre as variáveis mensuradas nos ensaios não-destrutivos e em ensaios destrutivos

7.8.1 Painel de 13 lâminas

Os resultados obtidos nos corpos-de-prova dos painéis de 13 lâminas com a aplicação do método do ultra-som – velocidade de propagação da onda e constante dinâmica C_{LL} – foram comparados com o módulo de elasticidade de elasticidade estático na direção longitudinal ($E_{s,l}$). Os resultados da associação avaliada – regressão linear entre as variáveis – estão apresentados na Figura 34.

Conforme usualmente constatado em análises dessa natureza (Hellmeister, 2003; Rocha, 2003, entre outros) as regressões tiveram melhores coeficientes de determinação quando do uso da constante dinâmica como variável independente (Figura 34b).

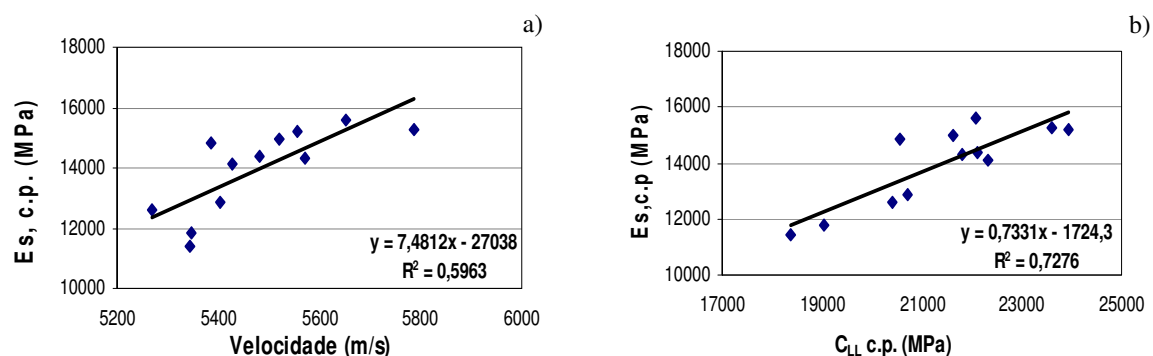


Figura 34– Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 13 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova.

Os valores da constante dinâmica C_{LL} resultaram maiores do que os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios destrutivos de flexão estática, fato também esperado. Segundo Wang e Chuang (2000), citados por Oliveira et al. (2003), isso é devido ao comportamento visco-elástico da madeira, que apresenta comportamentos melhores (tanto em rigidez quanto em resistência) para solicitações de menores durações de tempo, como é o caso dos ensaios não-destrutivos – solicitações dinâmicas.

7.8.2 Painel de 25 lâminas

As Figuras 35 a 38 ilustram as associações entre as principais variáveis avaliadas em ensaios não-destrutivos e destrutivos em corpos-de-prova dos painéis de 25 lâminas.

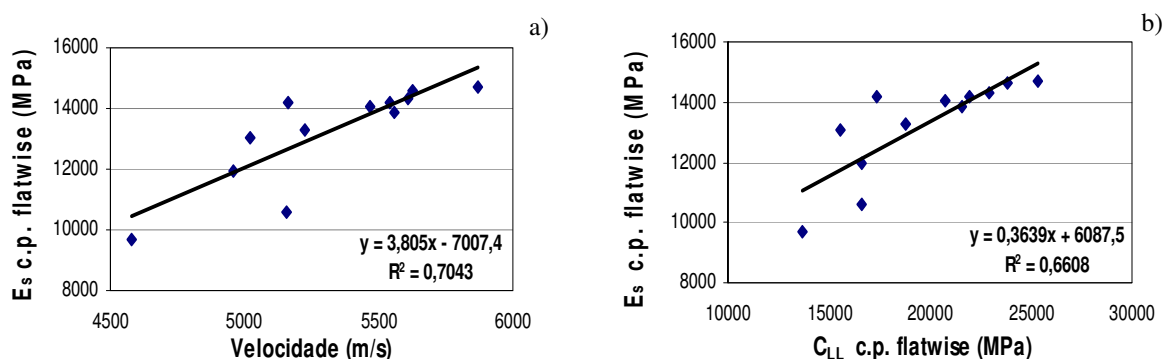


Figura 35 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *flatwise*; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *flatwise*.

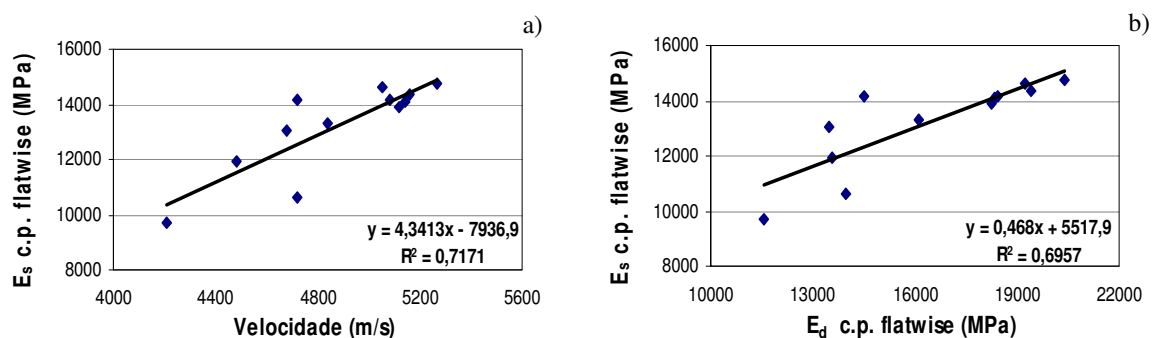


Figura 36 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *flatwise*; b) Regressão linear entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *flatwise*.

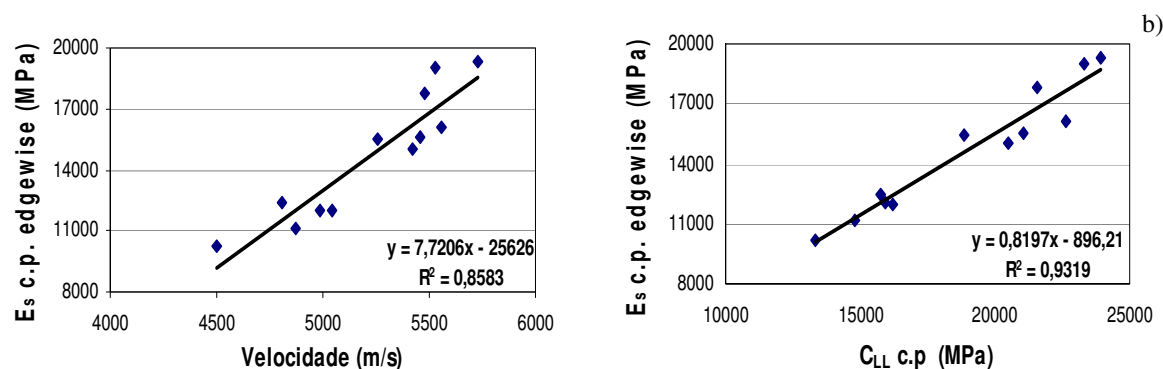


Figura 37 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *edgewise*; b) Regressão linear entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *edgewise*.

Novamente para a situação dos painéis com 25 lâminas foi constatado que os valores do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e da constante dinâmica (C_{LL}) foram superiores aos observados para os módulos de elasticidade estáticos.

Os coeficientes de determinação das regressões lineares variaram de 0,70 a 0,93, sendo considerados satisfatórios, se comparados ao padrão ($R^2 \geq 0,70$) assumido nas pesquisas desenvolvidas pelo CEVEMAD – Centro Virtual de Pesquisas em Madeiras.

As melhores associações foram obtidas quando da análise de resultados em corpos-de-prova ensaiados na posição *edgewise*. Nessas situações, o coeficiente de determinação foi superior a 0,80, com a velocidade como variável independente e superior a 0,91, quando usado o módulo dinâmico como variável independente.

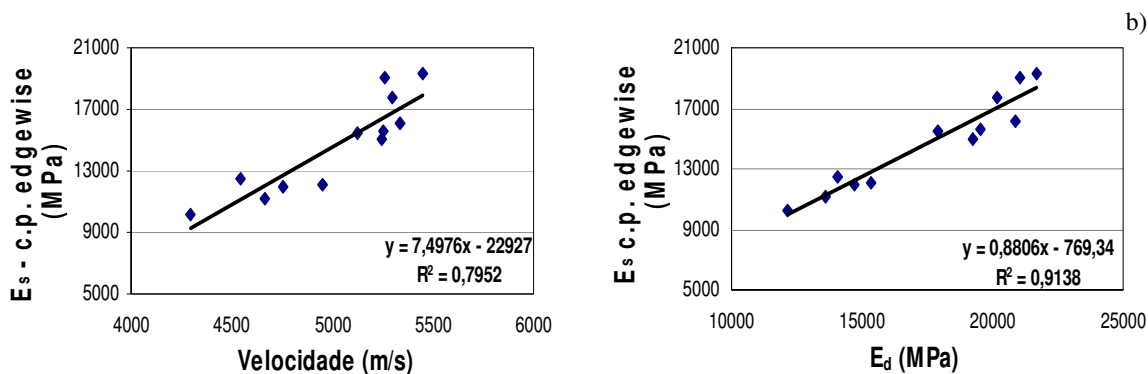


Figura 38 – Associação entre variáveis dos ensaios não-destrutivos e destrutivos – Painel de 25 lâminas. a) Regressão linear entre a velocidade de propagação da onda de tensão e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *edgewise*; b) Regressão linear entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade à flexão estática, obtidos em corpos-de-prova para ensaios *edgewise*.

As melhores regressões para os corpos-de-prova ensaiados na posição de maior inércia (flexão *edgewise*) são justificáveis.

Na situação de flexão na posição de menor inércia (flexão *flatwise*) a resistência da viga obtida do painel é condicionada à qualidade da lâmina mais tracionada no ensaio (lâmina da face do painel). No caso do ensaio não-destrutivo, o transdutor foi sempre posicionado no centro geométrico da seção transversal da viga e, teoricamente, o fenômeno de transmissão da onda ficou condicionado à qualidade (densidade, continuidade) das lâminas dessa região. Nem sempre a lâmina mais tracionada apresentava qualidade semelhante àquela que condicionou a transmissão mais rápida da onda (e que, naturalmente, definiu o tempo de transmissão e, em última análise, a velocidade da transmissão da onda).

Na situação de flexão na posição de maior inércia (flexão *edgewise*) condicionada, a resistência da viga foi condicionada por um somatório de contribuições de todas as lâminas que compunham o painel original.

7.9 Módulo de elasticidade teórico (seção homogeneizada)

Nos Quadros 63 e 64 são apresentados os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade longitudinal no ensaio de flexão estática no eixo de menor inércia dos painéis LVL de 13 lâminas ($E_{s,l}$) e 25 lâminas ($E_{s,f}$), e os valores do módulo de

elasticidade teórico (E_T) obtido pelo método de homogeneização da seção transversal. As Figuras 39 e 40 apresentam graficamente a tendência dos valores do módulo de elasticidade estático e teórico para os quatro tratamentos.

No Anexo 7 são apresentados os valores experimentais e teóricos dos corpos-de-prova dos 24 painéis estudados.

Quadro 63 - Corpos-de-prova – Painel de 13 lâminas – Valores de módulo de elasticidade à flexão estática na direção longitudinal e módulo de elasticidade teórico (E_T).

(MPa)	Tratamento							
	T1 (superior)		T2 (inferior)		T3 (racional)		T4 (alternado)	
	$E_{s,l}$	E_T	$E_{s,l}$	E_T	$E_{s,l}$	E_T	$E_{s,l}$	E_T
Médio	14662	18113	12025	13019	15139	17423	13969	15463
Mínimo	13155		10240		13876		11462	
Máximo	16075		13257		16357		16289	
D.Padrão	850,0		891,9		670,4		1401,8	
C.V.(%)	5,80		7,42		4,43		10,04	

Quadro 64 - Corpos-de-prova – Painel de 25 lâminas – Valores de módulo de elasticidade dos c.p. *flatwise* submetidos à flexão estática e módulo de elasticidade teórico (E_T).

(MPa)	Tratamento							
	T1 (superior)		T2 (inferior)		T3 (racional)		T4 (alternado)	
	$E_{s,f}$	E_T	$E_{s,f}$	E_T	$E_{s,f}$	E_T	$E_{s,f}$	E_T
Médio	14555	17336	10745	11874	13512	16364	14042	15635
Mínimo	13414		9365		12667		13326	
Máximo	16186		12599		14507		15166	
D.Padrão	620,6		1021,0		586,8		442,4	
C.V.(%)	4,26		9,50		4,34		3,15	

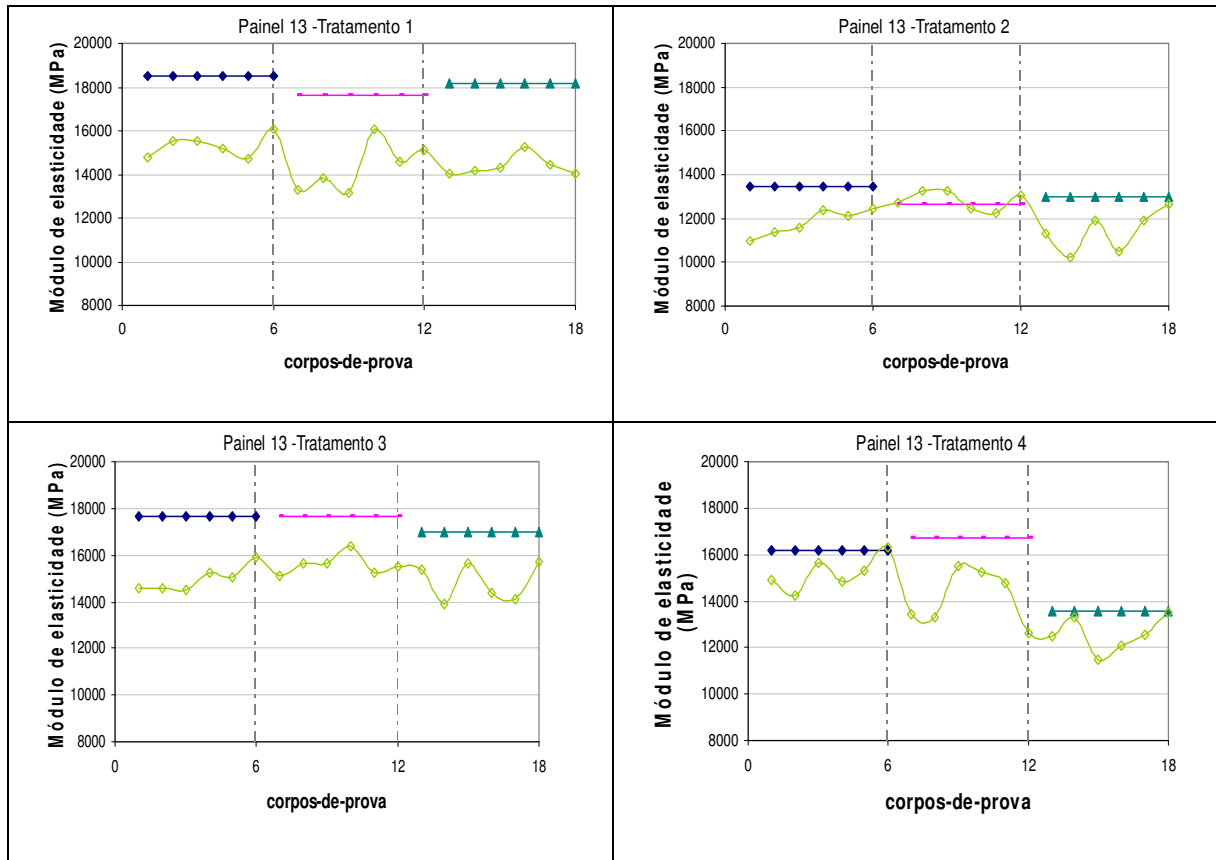


Figura 39 - Painel de 13 lâminas - Tendência dos valores do módulo de elasticidade estático e teórico para os quatro tratamentos.

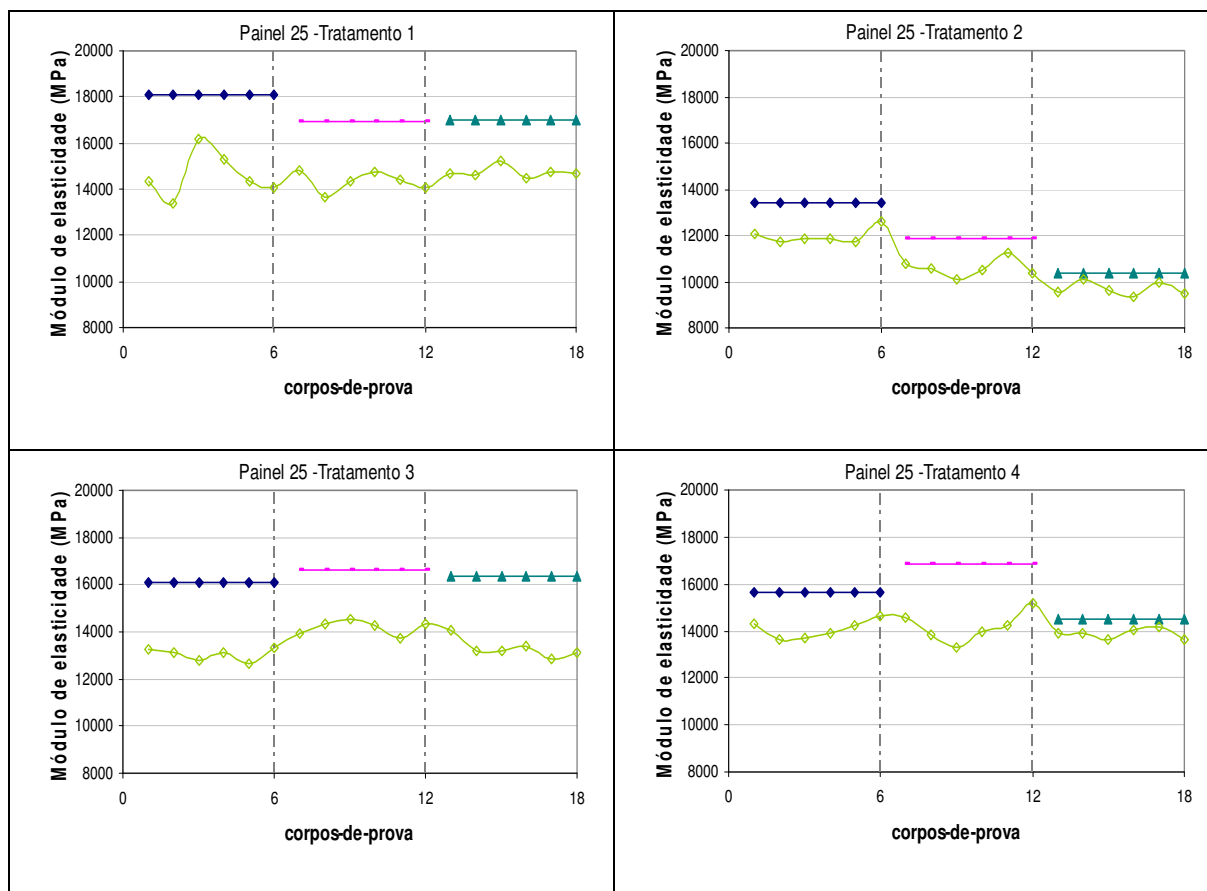


Figura 40 - Painel de 25 lâminas - Tendência dos valores do módulo de elasticidade estático e teórico para os quatro tratamentos.

Como se podia esperar, o tratamento 1 apresentou os melhores valores médios de módulo de elasticidade teórico e o tratamento 2 apresentou os menores valores, nas duas espessuras estudadas (13 lâminas e 25 lâminas).

Em geral os módulos de elasticidade teóricos calculados seguiram a mesma tendência dos módulos de elasticidade estáticos, acusando valores ligeiramente superiores a estes, como poderia ser esperado. Os módulos de elasticidade teóricos dos painéis foram obtidos com uso da constante dinâmica das lâminas, que apresenta valores sistematicamente superiores ao módulo de elasticidade estático.

De uma forma geral, as razões obtidas entre o valores experimentais e teóricos foram de 0,81; 0,92; 0,87 e 0,90 para T1, T2, T3 e T4 nos painéis de 13 lâminas e de 0,84; 0,90; 0,83 e 0,90 para T1, T2, T3 e T4 nos painéis de 25 lâminas.

7.10 Compilação dos resultados obtidos

Diante do apresentado e discutido neste capítulo, podem-se resumir os resultados obtidos como segue:

Produção dos LVL em escala industrial

- os resultados abonam a prática de mensuração da variável módulo dinâmico das lâminas numa única faixa, que é representativa da lâmina;
- os tempos de prensagem dos painéis LVL podem ser estimados com as relações empíricas sugeridas pelos fabricantes; os tempos calculados pela relação recomendada pelo fabricante para a temperatura nos pratos da prensa foram semelhantes aos observados nos ensaios;
- nos ensaios preliminares, para painéis de 9 e 17 lâminas (com espessura nominal de 2,8 mm cada lâmina) os tempos estimados e confirmados foram de 30 min e 52,4 min, respectivamente; nos ensaios principais, os painéis de 13 e 25 lâminas (com espessura nominal de 2,2 mm cada lâmina) os tempos de prensagem foram 32 min e 55 min;
- o perfil da elevação da temperatura observado no centro dos painéis e nas faces foi semelhante aos observados nos compósitos de madeira, conforme descrito por Bolton et al. (1989), Zombori (2001) e Calegari et al. (2000).
- a temperatura alcançada no centro dos painéis foi adequada para a cura do adesivo utilizado;
- os valores da temperatura de cura do adesivo fenol-formaldeído aqui utilizados (120-125°C) são também semelhantes aos valores mínimos apresentados por outros autores e fabricantes destes adesivos.

Buscando facilitar a interpretação dos resultados aqui compilados, é resgatado e novamente apresentado o Quadro 65 com as características principais dos tratamentos estudados.

Quadro 65- Painéis de 13 e 25 lâminas – Características de suas produções.

Tratamento			
T1 superior	T2 inferior	T3 racional	T4 alternado
somente lâminas de alto módulo de elasticidade	somente lâminas de baixo módulo de elasticidade	lâminas de alto módulo nas faces do painel	combinação alternada de lâminas de alto e baixo módulo de elasticidade

Painéis LVL de 13 lâminas

- todos os painéis comerciais apresentaram empenamentos que variaram de 6 mm a 180 mm, este último considerado elevado;
- o empenamento se mostrou evidente nos painéis, mas não nas vigas e outros elementos produzidos a partir dos painéis;
- o tratamento 4 – painel com combinação de lâminas de alto e baixo módulo de elasticidade - foi o que apresentou menores valores de empenamento;
- os empenamentos se devem provavelmente a tensões internas dos painéis; para amenizar esse problema, alguns autores indicam colocar algumas lâminas (normalmente três) na direção transversal do painel;
- os painéis produzidos apresentaram densidade aparente variando de 0,685 g/cm³ a 0,753 g/cm³, com baixo coeficiente de variação dos resultados; considerando-se que a densidade aparente média dos pinus tropicais (*P. caribae* var. *caribae*, *P. caribae* var. *bahamensis*, *P. caribae* var. *hondurensis* e *P. oocarpa*) a 12% de umidade, reportada pela NBR 7190 (ABNT,1997) é de 0,547 g/cm³ e que igual parâmetro avaliado para as lâminas originais resultou em densidade aparente de 0,617 g/cm³, verifica-se que todos os painéis ultrapassaram esses dois valores referenciais;
- o tratamento 4 apresentou valor médio de densidade aparente mais alto e o tratamento 2 apresentou o valor médio mais baixo;
- não houve diferença estatística significativa entre os valores médios de umidade dos tratamentos estudados; a umidade dos painéis nos 4 tratamentos estudados variou de 10,14% a 10,68%;

- a absorção de água dos painéis variou de 27,8% a 34,1%, valores que podem ser considerados dentro dos limites observados por outros pesquisadores;
- verificou-se que os tratamentos com maiores valores médios de densidade (T1 e T4) obtiveram os valores mais baixos de absorção de água;
- as velocidades de propagação de ondas de tensão e de ondas de ultra-som nos painéis foram sempre superiores a 5100 m/s (transmissão longitudinal) e 1180m/s (transmissão transversal);
- a relação entre velocidades de propagação e módulos (ou constantes dinâmicas) nas direções transversal e longitudinal variou de 1/15 a 1/20;
- quando comparados os dois métodos não-destrutivos, verificou-se que, sistematicamente, as ondas de ultra-som se propagaram com maior velocidade que as ondas de tensão, sobretudo nas transmissões na direção longitudinal;
- houve diferença estatística nas resistências à flexão longitudinal entre os tratamentos (T3=T4>T1>T2), embora os valores tenham variado pouco (de 92 MPa a 115 MPa) entre comportamentos extremos;
- houve diferença estatística nos módulos de elasticidade à flexão longitudinal (T3>T1>T4>T2); os valores variaram de 12 GPa a 15 GPa.
- dentro dos tratamentos, os coeficientes de variação dos resultados observados para a resistência e rigidez foram baixos (da ordem de 5%), o que revela, de forma marcante, a elevada homogeneidade dentro desses tratamentos.
- os valores médios obtidos na flexão longitudinal para os quatro tratamentos estão acima dos valores referenciais (NBR 7190/97), tanto para a variável resistência à flexão estática como para módulo de elasticidade.
- os tratamentos apresentaram desempenho semelhante entre si para a resistência e módulo de elasticidade na flexão transversal;
- as relações entre resistência e rigidez médias nas direções longitudinal e transversal foram da ordem de 20;
- houve diferença estatística na resistência da colagem ao esforço de cisalhamento nas três condições de ensaio dos corpos-de-prova (seco, úmido e após fervura) com superioridade dos tratamentos T4 e T1;

- o desempenho superior das colagens dos tratamentos T4 e T1, em relação ao T2 e T3, pode ter ocorrido pela utilização de lâminas de melhor qualidade (lâminas com maior porcentagem de altos valores de módulo de elasticidade) na composição dos painéis;
- de acordo com os valores médios de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e porcentagem de falha na madeira, observa-se que os painéis LVL, nos quatro tratamentos, atendem aos requisitos estabelecidos nas três condições de exposição (uso interior, intermediário e exterior);
- os módulos de elasticidade teóricos calculados pelo método de homogeneização da seção transversal seguiram a mesma tendência dos módulos de elasticidade estáticos.

Painéis LVL de 25 lâminas

- não foi constatado empenamento visível nesses painéis, devido, sobretudo às suas espessuras, que lhes conferem maior rigidez no plano transversal;
- os painéis produzidos apresentaram densidade aparente variando de 0,640 g/cm³ a 0,729 g/cm³, com baixo coeficiente de variação dos resultados;
- novamente, verifica-se que todos os painéis ultrapassaram o valor referencial teórico sugerido pela NBR 7190 (ABNT, 1997) para os pinus tropicais, bem como a densidade média das lâminas que os originaram;
- a umidade média dos painéis nos 4 tratamentos variou de 9,7% a 10,2%;
- as velocidades de propagação de ondas de tensão e de ondas de ultra-som nos painéis de 25 lâminas tiveram variação bastante próxima da observada para os painéis de 13 lâminas, com valores médios sempre superiores a 4700 m/s (transmissão longitudinal) e 1400m/s (transmissão transversal);
- o tratamento T1 obteve os valores médios mais altos, nas duas variáveis analisadas (velocidade de propagação da onda e módulo de elasticidade dinâmico). O tratamento T2 foi o que apresentou menores valores, para ambos os ensaios.;
- no método das ondas de tensão houve diferença estatística entre os tratamentos, para os dois parâmetros avaliados (velocidade e módulo dinâmico), sendo $T1 \geq T4 > T3 > T2$;
- no método das ondas de ultra-som houve diferença estatística entre os tratamentos, para os dois parâmetros avaliados (velocidade e constante dinâmica), sendo $T1 > T4 > T3 > T2$;

- a relação entre módulos (ou constantes dinâmicas) nas direções transversal e longitudinal variou de 1/11 a 1/16;
- houve diferença estatística nas resistências e módulos de elasticidade à flexão em relação ao eixo de maior inércia (*edgewise*) entre os tratamentos, com $T1 > T4 > T3 > T2$ (para resistências) e $T1 > T4 > T3 = T2$ (para rigidez); não foi observada a esperada igualdade estatística entre os desempenhos à flexão (resistência e rigidez) dos tratamentos T3 e T4;
- houve diferença estatística nas resistências e módulos de elasticidade à flexão em relação ao eixo de menor inércia (*flatwise*) entre os tratamentos, com $T1 > T4 = T3 > T2$ (para resistências) e $T1 \geq T4 > T3 > T2$ (para rigidez); não foi observada a esperada igualdade estatística entre os desempenhos à flexão (resistência e rigidez) dos tratamentos T1 e T3; para rigidez, surpreendentemente o tratamento T4 se mostrou superior ao tratamento T3;
- houve diferença estatística nas resistências ao cisalhamento entre os tratamentos ($T2 \geq T1 \geq T3 > T4$), embora os valores tenham variado pouco (de 8,95 MPa a 10,11 MPa) entre comportamentos extremos; todos os tratamentos apresentaram valores médios superiores ao da madeira sólida;
- houve diferença estatística nas resistências à compressão paralela às fibras entre os tratamentos ($T1 > T4 > T3 = T2$); não foi observada a esperada igualdade estatística entre as resistências à compressão dos tratamentos T3 e T4.
- os módulos de elasticidade teóricos calculados pelo método de homogeneização da seção transversal seguiram a mesma tendência dos módulos de elasticidade estáticos, acusando valores ligeiramente superiores a estes.

8. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no programa experimental e atendendo aos objetivos deste trabalho, podem-se extrair as seguintes conclusões:

- os painéis LVL puderam ser produzidos industrialmente, utilizando-se os mesmos equipamentos e variáveis gerais do processo de fabricação de compensados;
- as formulações empíricas sugeridas pelos fabricantes de adesivos para a produção de compensados estimam, com boa precisão, os tempos de prensagem necessários para fabricação de painéis LVL, mesmo nos casos de painéis LVL com espessuras maiores do que as usualmente empregadas nos compensados;
- todos os tratamentos estudados para os painéis LVL revelaram bom desempenho físico-mecânico, ultrapassando os limites médios de referência (códigos normativos) estabelecidos para madeira sólida originária; os coeficientes de variação obtidos para os valores de todas as propriedades foram inferiores aos usualmente observados para madeira sólida, o que revela, de forma marcante, a elevada homogeneidade desse produto;
- foi possível separar as lâminas de diferentes qualidades com uso de ensaios não-destrutivos de ondas de tensão e ultra-som; o método do ultra-som revelou-se de maior praticidade relativa;
- para os painéis LVL de 13 lâminas, não se justificou, em termos de resistência, a disposição de lâminas de maior módulo de elasticidade na face e contra-face dos painéis; o tratamento estatístico T3 (racional) não teve desempenho de resistência superior ao tratamento T4 (alternado);

- para os painéis LVL de 13 lâminas, justificou-se, em termos de rigidez, a disposição de lâminas de maior módulo de elasticidade na face e contra-face dos painéis; o tratamento estatístico T3 (racional) teve desempenho de rigidez superior ao tratamento T4 (alternado);
- para os painéis LVL de 25 lâminas, não se justificou, em termos de resistência e rigidez à flexão em relação a qualquer dos dois eixos principais (de menor e de maior inércia), a disposição de lâminas de maior módulo de elasticidade na face e contra-face dos painéis; o tratamento estatístico T3 (racional) não teve desempenho de resistência superior ao tratamento T4 (alternado);
- os módulos de elasticidade teóricos calculados pelo método de homogeneização da seção transversal, para os painéis de 13 e 25 lâminas, seguiram a mesma tendência dos módulos de elasticidade estáticos.

Na continuidade deste trabalho, entende-se como importante o desenvolvimento de pesquisas com painéis LVL de outras espécies de rápido crescimento (como Eucalyptus, por exemplo), bem como pesquisas com painéis LVL que contém com algumas lâminas dispostas transversalmente, para combater o empenamento, sobretudo nos painéis de menor espessura.

9. REFERÊNCIAS

AITIM. LVL: producto estructural basado em chapas de madeira. *Boletín de Información Técnica (AITIM)*, Madrid, n. 198, p. 15-18, mar. / abr. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. *Annual book of ASTM standards*: ASTM-D 5456. Philadelphia, 1996, v. 04.09, 644 p. (Section 4. Constructions).

APA EWS STANDARD. *PRL*: 501: performance standard for APA EWS laminated veneer lumber. Tacoma, 2000. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. Programa Nacional de Qualidade da Madeira. Catálogo Técnico nº1. Compensado de Pinus. Curitiba, 2002. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br>>. Acesso em: 15 mar. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 12466-1*: Madeira compensada - Qualidade de colagem - Parte 1: métodos de ensaio. Rio de Janeiro; 2006. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 12466-2*: Madeira compensada - Qualidade de colagem - Parte 2: requisitos. Rio de Janeiro; 2006. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190*: projeto de estruturas de madeira (NBR 7190). Rio de Janeiro; 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Organismo de Normalização Setorial de Ensaios não-destrutivos. Comissão de Estudos CE 58:000.10. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR Projeto 31:000.05-001/2*: proposta: painéis de madeira compensada. Rio de Janeiro, 2004. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR Projeto 31:000.05-001/3*: proposta: painéis de madeira compensada. Rio de Janeiro, 2004. 72 p.

AYDM, I et al. A comparative study on some physical and mechanical properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) produced from Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) veneers. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 62, n.3, p. 218-220, 2004.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; HERNÁNDEZ, R. E. Montagem de equipamento para ensaios não-destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 6, 1998, Florianópolis, SC. *Anais...* Florianópolis: IBRAMEM, 1998, v.4, p.345-354.

BARTHOLOMEU, A. *Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som*. 75 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)–Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R. Método para classificação de vigas de madeira de dicotiledôneas utilizando ultra-som. In: SEMINÁRIO SOBRE A APLICAÇÃO DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS NA MADEIRA E EM MATERIAIS A BASE DE MADEIRA, 1., 2006, Itatiba, SP. *Anais...* Itatiba: ABENDE, 2006.

BENITES, L. Características de madera de chapas laminadas (LVL) de plantaciones de rápido crecimiento del Uruguay - *Eucalyptus grandis*, *Populus* spp., *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*. *Nota Técnica*, n. 3 - LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay), 2005. 5p.

BIER, H. *Radiata pine plywood* - an experimental study of the bending properties of structural plywood. Rotorua: New Zealand Forest Service, 1983. 24 p. (FRI Bulletin, 53).

BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar: Krieger, 1993. 712 p.

BOLHEN, J. C. LVL laminated-veneer lumber: development and economics. *Forest Products Journal*, Madison, v. 22, n. 1, p. 18-26, 1972.

BOLTON, A. J.; HUMPHREY, P. E.; KAVVOURAS, P. K. The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Part III. Predicted vapour pressure and temperature variation with times, compared with experimental data for laboratory boards. *Holzforshung*, v. 43, n. 4, p. 265-274, 1989.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero *Eucalyptus*, avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 63, p. 65-78, 2003.

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

BUCUR, V. *Acoustics of wood*. New York: Springer-Verlag, 2006. 393 p.

BUCUR, V. *Ondes ultrasonores dans le bois: caractérisation mécanique et qualité de certaines essences de bois*. 1984. 188 p. Thèse (Doctorat en Génie Mécanique)–Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint-Quen, France.

CARVALHO, A. M.; MACHADO, J. S. Avaliação da porcentagem de delaminação em painéis LVL de Eucalipto segundo normas européias. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: Universidade Estadual do Mato Grosso, 2004.

CALEGARI, L. et al. Elevação da temperatura durante a prensagem de painéis aglomerados colados com tanino-fenol-formaldeído. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 8., 2000, Nova Prata-RS. *Anais...* Santa Maria: UFSM, 2000. p. 646-650.

CERTIFICATE. Finlândia: VTT, n. 184/03, 24 Mar. 2004. 19 p.

CHUI, Y. H.; SCHNEIDER, M. H.; ZHANG, H. J. Effects of resin impregnation and process parameters on some properties of Poplar LVL. *Forest Products Journal*, Madison, v. 44, n. 7/8, p. 74-78, 1994.

ÇOLAKI, S. et al. Some technological properties of laminated veneer lumber manufactured from pine (*Pinus sylvestris* L.) veneers with melamine added – UF resins. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, Ankara, n. 28, p. 109-113, 2004.

DAÍ, C. H.; WANG, S. Press control for optimized wood composite processing and properties. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004. p.65-82. (FPL-GTR-149).

DIEULESAINT, E; ROYER, D. *Ondes élastiques dans les solides*. Paris: Masson et Cie., 1974.

ECKELMAN, C.A. Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. *Forest Products Journal*, Madison, v. 43, n. 4, p. 19-24, 1993.

ECKELMAN, C. A.; PICADO, F. Usos potenciales de la madera laminada en la fabricación de muebles. *Tecnología en Marcha*. Cartago, v. 11, n. 4, p. 3-14, 1993.

ENGINEERED WOOD SYSTEMS. *PRL: 501 performance standard for APA EWS laminated veneer lumber*. Tacoma, 2000. 6 p.

ENGINEERED WOOD PRODUCTS. LVL: laminated veneer lumber. Canadian Wood Council. Disponível em: <<http://www.cwc.ca/NR/rdonlyres/35C376ED-F20A-43EB-8405-D70C452CAB68/0/EngineeredWoodProducts.pdf/>>. Acesso em: 18 jun. 2007.

ENGINEERED WOOD SYSTEMS. PRL: 501 performance standard for APA EWS laminated veneer lumber. Tacoma, 2000. 6 p.

ERICKSON, J. R. et al. *Red maple LVL manufacturing and testing*. [Houghton, MI]: Michigan Technological University, 2002.

EWG - ENGINEERED WOOD PRODUCTS. LVL: laminated veneer lumber. Canadian Wood Council. Disponível em: <<http://www.cwc.ca/NR/rdonlyres/35C376ED-F20A-43EB-8405-D70C452CAB68/0/EngineeredWoodProducts.pdf/>>. Acesso em: 18 jun. 2007.

GABRIEL, M. S. C.; BALLARIN, A. W. Determinação do módulo de elasticidade da madeira de P. taeda com uso do método não-destrutivo das ondas de tensão. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. *Anais ...* São Carlos: LaMEM, EESC, USP, 2000.

GERHARDS, C. C. *Effect of cross grain on stress waves in lumber*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1981 (Research. paper FPL-RP-368).

GERHARDS, C. C. *Effect of knots on stress waves in lumber*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1982 (Research. paper FPL-RP-384).

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 269-274, 2000.

GREEN, D.W.; HERNANDEZ, R. Codes and standards for structural wood products and their use in the United States. . In: FOREST PRODUCTS SOCIETY ANNUAL MEETING, 1998, Yucátan. *Proceedings...* Yucátan: North American Forestry Commission, 1998. 14p.

HARDING, O. V.; ORANGE, R. P. The effect of juvenile wood and lay-up practices on various properties of Radiata pine laminated veneer lumber. *Forest Products Journal*, Madison, v. 48, n. 7/8, p. 63-70, 1998.

HEARMON R. F. S., Vibration testing of wood. *Forest Products Journal*, Madison, v. 16, n. 8, p. 29-40, 1966.

HELLMEISTER, L. A. V. *Aplicação do método das ondas de tensão na caracterização mecânica de toras, pranchas e tábuas de Pinus taeda L.* 2003. 164f. Tese (Doutorado em

Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 2003.

HERZIG, L. Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage. 1992, 290 p. Thesis (M.Sc. Génie Forestière)-Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, 1992.

H'NG, P. S.; TAHIR, P. M; AHMAD, Z. Edgewise bending properties of LVL: effects of veneer thickness and species. In: JOINT INTERNATIONAL SYMPOSIUM LIGNOCELLULOSE-MATERIAL OF THE MILLENNIUM: TECHNOLOGY AND APPLICATION, 2001, Penang. *Proceedings...*Penang: USM-JIRCAS, 2001. 9p.

HOOVER, W. L. et al. Material design factors for hardwood laminated veneer lumber. *Forest Product Journal*, Madison, v. 37, n. 9, p. 15-23, 1987.

IWAKIRI, S. *Painéis de madeira*. Curitiba: FUPEF, 1998. 128 p. (Série didática, 1/98).

JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, Madison, v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

JUNG, J. Properties of parallel laminated veneer from stress-wave-tested veneers. *Forest Products Journal*, Madison, v. 32, n. 7, p. 30-35, 1982.

JUNG, J; DAY, K. *Strength of fasteners in parallel-laminated veneer*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1981. (Research. paper FPL-RP-5389).

KAISERLIK, J. H.; PELLERIN, R. F. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products Journal.*, Madison, v. 27, n. 6, p. 39-43, 1977.

KIMMEL, J. D.; JANOWIAK J. J. Red maple and yellow-poplar LVL from ultrasonically graded veneer. *Forest Products Journal.*, Madison, v. 45, n. 7/8, p. 54-58, 1995.

KOCH, P.; WOODSON, G. E. Laminating butt-jointed, log run southern pine veneers into long beams of uniform high strength. *Forest Products Journal*, Madison, v. 18, n. 10, p. 45-51, 1968.

KOLLMANN, F. F. P; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. *Principles of wood science and technology*. Berlin: Springer, 1975. v. 2, 703 p.

KOUBAA, A. et al. Nondestructive evaluation of physical, mechanical and anatomical properties of fast growing poplar hybrid clones. In: INTERNACIONAL WOOD QUALITY WORKSHOP "TIMBER MANAGEMENT TOWARD WOOD QUALITY AND END-PRODUCT VALUE", 1997, Quebec. *Proceedings...*CTIA/UFRO, 1997, p.47-53.

KRETSCHMANN, D. et al. Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1993. 31 p. (Research. paper FPL-RP-521).

KUNESH, R. H. Micro-lam structural laminated veneer lumber. *Forest Products Journal*, Madison, v. 28, n. 7, p. 41-44, 1978.

LAUNFENBERG, T. Exposure effect upon performance of laminated veneer lumber and glulam materials. *Forest Products Journal*, Madison, v. 32, n. 9, p. 42-48, 1982.

LAUNFENBERG, T. Parallel-laminated veneer: processing and performance research review. *Forest Products Journal*, Madison, v. 33, n. 9, p. 21-28, 1983.

LUXFORD, R.F. *Strength of glue-laminated Sitka spruce made of rotary-cut veneers*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1944. (FPL-Rep-1512).

MATOS, J. L. M. *Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda L.* 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

McKEEVER, D.B. Engineered wood products: a response to the changing timber resource. *Pacific Rim Wood Market Report*, Gig Harbor, n.123, p. 5-15, 1997.

McKENZIE, H.; GEA, L.; GAUNT, D. Eucalyptus nitens laminated veneer lumber. *Boletín del CIDEU*, Huelva, n. 2, p. 51-55, 2006.

NELSON PINE LAMINATED VENEER LUMBER LVL. NP form: LVL formwork beams NZ/AUS E10. Richmond, 2003. não paginado.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. Correlações entre módulos de elasticidade estático (flexão) e dinâmico (ultra-som) para algumas espécies de Eucalipto In. CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2., 2002, Curitiba. *Anais ...* Curitiba: UFPR, 2002. CD-ROM.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A.W. Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. In: CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS (PANNDT), 3., 2003, Rio de Janeiro. *Proceedings ...* Rio de Janeiro: ABENDE, 2003/1 CD-ROM.

NOGUEIRA, M. *Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira de Pinus taeda L. com uso de ultra-som*. 2003. 144 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

NOGUEIRA, M. *Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de Eucalyptus sp. com uso de ensaios não-destrutivos*. 2007. 120 f. Tese (Doutorado em

Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

NORLIN, L. P.; NORLIN, C. M.; LAM, F. Shear behaviour of laminated Douglas-fir veneer. *Wood Science and Technology*, v. 33, p.199-208, 1999.

OLIVEIRA, F. G. R. et al. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som., In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3, 2003, Rio de Janeiro. 5 p.

OZARZKA, B. A review of the utilization of hardwoods for LVL. *Wood Science and Technology*, v. 33, p. 341-351, 1999.

PLY VISIONS. Hannover: RAUTE, n. 5, Apr. 2005. 20 p.

PUCCINI, C. T. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som. 2002, 72 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Construções Rurais e Ambiente)–Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2002.

RAUTE ENGINEERED WOOD. *Tecnología de LVL: vigas de chapas laminadas*. Santiago, 1980. não paginado.

ROCHA, R. R. *Avaliação não-destrutiva de madeiras para dormentes ferroviários*. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

ROSS, R. J. Stress wave propagation in wood products. In: NON DESTRUCTIVE TESTING OF WOOD SYMPOSIUM, 5., 1985, Pullman, WA. *Proceedings...*Pullman, WA: Washington State University, 1985. p. 291-318.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. *Nondestructive testing for assessing wood members in structures*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. (General technical report FPL-GTR 70).

ROSS, R. J. et al. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12., 2000, Sopron.. *Proceedings...*Hungary, Sopron. p. 155-163.

SANDOZ, J. L. *Triage et fiabilité des bois de construction*. 1990, 186 p. Thèse (Doctorat en Sciences Techniques)–Département de Génie Civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 1990.

SASAKI, H. et al. Laminated veneer lumber and composite beams produced from tropical hardwood thinning. In: RECENT RESEARCH ON WOOD AND WOOD-BASED

MATERIALS (CURRENT JAPANESE MATERIALS RESEARCH), 1993, *Anais...* Londres: Elsevier Science, 1993. v. 11, p. 55-66.

SASAKI, H.; KAWAI, S. Recent research and development work on wood composites in Japan. *Wood Science and Technology*, New York, v. 28, p. 241-248, 1994.

SCHAFFER, E. L. FPL press-lam process: fast, efficient conversion of logs. *Forest Product Journal*, Madison, v. 21, n. 11, p.11-18, 1972.

SCHAFFER, E.L. et al. *Feasibility of producing a high-yield laminated structural product*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1972. 20 p. (Research. paper FPL-482).

SPELTER, H. Plywood niche narrows but producers still have ample opportunities. *Panel World*, Montgomery, v. 38, n. 5, p. 28-31, 1997.

SPELTER, H. ; WANG, R. ; INCE, P. *Economic feasibility of products from inland west small-diameter timber*. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1996. 20 p. (Research Paper, FPL-92).

TAMMELA, I. Laminated venner lumber (LVL) manufacturing. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte. *Anais...* Viçosa: SIF/UFV/DEF, 1998. p. 162-168.

THE VERSATILE scaffold plank. Woodburn: z-Plank, 2004.

TOMASELLI, I. Secagem das lâminas para indústria de painéis. *Madeira / Móveis*. Bento Gonçalves, v. 1, n. 1, p. 27-33, 1983.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: FPL, 1999. 474 p.

WANG, X. et al. In INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12, 2000, Sopron. *Proceedings...*Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 197 – 206.

WANG, X. et al. *Comparison of several non-destructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2001. 9 p. (Research paper)

WANG, X. et al. Diameter effect on stress wave evaluation of modulus of elasticity of logs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD., 13, 2002, Berkeley. **Abstracts...** Berkeley, USA. 2002. p. 149-156.

WANG, X. et al. *Flexural properties of laminated veneer lumber manufactured from ultrasonically rated red maple veneer: a pilot study*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2003. 5 p. (Research. Note. FPL-RN-0288).

WAUBKE, N. V. Grundsätzliche Untersuchungen zur Eignung der Ultraschallimpulslaufzeitmessungen als vereinfachte und genauere Methode zur KLASSIFIKATION VON bauhölzern. 56p. Institut für Baustoffkunde und Bauphysik der Hochschule der Bundeswehr München, Deutschland, 1981.

WELLONS, J. D. et al. Thickness loss in hot-pressed plywood. *Forest Product Journal*, Madison, v. 33, n. 1, p. 27-34, 1983.

YOUNGQUIST, J. A. et al. *Design, performance, and installation of a Press-Lam basement beam in a factory-built house*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1978. 8 p. (Research paper FPL-316).

ZOMBORI, B. G. *Modeling the transient effects during the hot-pressing of wood-based composites*. 2001.205 f. Tese (Ph.D.)-Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.

ANEXO 1

**Resultados da variação do módulo de elasticidade dinâmico nas
bordas e centro dos painéis**

lâmina	Peso (g)	Espes (cm)	Larg (cm)	Alt (cm)	Dens (g/cm ³)	Dist.onda (m)	Leitura ondas de tensão				veloc.2 (m/s)	veloc.1-3 (m/s)	Ed centro (MPa)	Ed bordas (MPa)
							t1 (µs)	t2 (µs)	t3 (µs)	méd t1-t3				
493	702,4	2,88	60,50	60,00	0,672	0,58	111,00	116,00	114,00	112,50	5000	5156	16797	17858
494	817,7	3,13	61,00	60,00	0,714	0,58	115,00	124,00	112,60	113,80	4677	5097	15616	18541
495	744,9	3,09	60,50	60,00	0,664	0,58	114,60	113,00	120,30	117,45	5133	4938	17496	16195
496	432,5	2,89	60,00	60,00	0,416	0,58	135,60	128,00	150,00	142,80	4531	4062	8535	6858
497	459,2	2,87	59,50	60,00	0,448	0,58	120,00	135,00	124,00	122,00	4296	4754	8273	10130
498	496,1	3,01	59,50	60,00	0,462	0,58	122,00	135,00	131,00	126,50	4296	4585	8522	9705
499	492,6	3,01	59,50	60,00	0,458	0,58	133,00	122,00	119,30	126,15	4754	4598	10361	9690
500	495,9	3,08	59,00	60,00	0,455	0,58	122,60	121,60	115,00	118,80	4770	4882	10347	10841
501	495,4	2,78	60,00	60,00	0,495	0,58	151,00	136,00	134,00	142,50	4265	4070	9003	8200
502	564,7	3,00	59,50	60,00	0,527	0,58	145,00	121,00	121,30	133,15	4793	4356	12115	10005
503	531,0	3,01	59,50	60,00	0,494	0,58	135,30	135,00	144,30	139,80	4296	4149	9121	8506
504	711,5	3,01	60,00	60,00	0,657	0,58	116,60	127,00	127,60	122,10	4567	4750	13695	14816
505	674,4	3,05	60,00	60,00	0,614	0,58	116,00	119,00	138,30	127,15	4874	4562	14591	12780
506	586,3	2,93	59,50	60,00	0,561	0,58	126,00	133,00	114,30	120,15	4361	4827	10659	13061
507	794,4	3,09	61,00	60,00	0,702	0,58	113,60	114,30	130,00	121,80	5074	4762	18087	15928
508	743,4	2,92	60,50	60,00	0,701	0,58	119,00	115,00	116,00	117,50	5043	4936	17840	17089
509	720,0	2,94	60,50	60,00	0,675	0,58	114,60	122,00	114,00	114,30	4754	5074	15248	17372
510	811,8	3,13	60,50	60,50	0,709	0,58	118,60	121,00	117,00	117,80	4793	4924	16281	17177
	Máx=	3,61										min	4610	4252
	Mín=	2,41										máx	18653	18640
	Média=	3,00										média	11481	11470
												des pad	2880	2736

ANEXO 2

**Resultados da variação do tempo de prensagem em painéis LVL
de 60x60 cm.**

ANEXO 3

**Resultados da variação do tempo de prensagem em painéis LVL
com tamanhos estruturais.**

Painel LVL 25 A												
lâmina	espessura (mm)				esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Dens.bás (g/cm ³)	tempo (µs)	Veloc. (m/s)	Ed (Mpa)
	1	2	3	4								
1	2,16	2,08	2,20	2,17	0,22	255,0	130,5	3480,0	0,49	451,1	4433,6	9550
2	2,07	2,61	2,35	2,55	0,24	262,0	136,0	4370,0	0,51	409,3	4886,4	12227
3	2,43	2,27	2,47	2,48	0,24	255,2	135,2	3520,0	0,42	449,1	4453,4	8387
4	2,16	2,20	2,17	2,15	0,22	254,5	133,4	3460,0	0,47	427,9	4674,0	10260
5	2,19	2,34	2,19	2,20	0,22	261,4	136,2	4560,0	0,57	389,9	5129,5	15112
6	2,40	2,42	2,30	2,14	0,23	284,6	134,7	3640,0	0,41	448,9	4455,3	8142
7	2,05	2,14	2,12	2,15	0,21	262,8	135,5	5000,0	0,66	367,8	5437,7	19631
8	2,25	2,05	2,15	2,34	0,22	255,3	133,7	3530,0	0,47	435,1	4596,6	9944
9	2,54	2,28	2,29	2,20	0,23	262,8	136,7	4260,0	0,51	402,8	4965,2	12561
10	2,04	2,25	2,03	2,26	0,21	255,0	131,7	3490,0	0,48	572,8	3491,6	5906
11	2,39	2,41	2,24	2,26	0,23	262,2	136,0	4380,0	0,53	418,1	4783,5	12089
12	2,51	2,40	2,25	2,23	0,23	255,5	134,4	3560,0	0,44	440,5	4540,3	9104
13	2,21	2,35	2,39	2,09	0,23	264,0	135,8	4260,0	0,53	401,1	4986,3	13072
14	2,10	2,32	2,30	2,08	0,22	255,0	135,4	3670,0	0,48	467,6	4277,2	8839
15	2,28	2,27	2,11	2,23	0,22	263,2	136,0	4224,0	0,53	373,0	5361,9	15265
16	2,10	2,10	2,02	2,03	0,21	255,0	135,5	3560,0	0,50	448,9	4455,3	9916
17	2,24	2,32	2,34	2,29	0,23	263,2	137,0	4340,0	0,52	380,6	5254,9	14466
18	2,28	2,20	2,25	2,08	0,22	255,0	134,5	3470,0	0,46	456,8	4378,3	8806
19	2,15	2,22	2,15	2,09	0,22	263,7	136,7	4430,0	0,57	390,4	5123,0	14984
20	2,51	2,33	2,23	2,24	0,23	255,0	131,4	3360,0	0,43	511,6	3909,3	6584
21	2,47	2,41	2,44	2,43	0,24	263,2	138,0	4010,0	0,45	411,1	4865,0	10720
22	2,34	2,36	2,30	2,22	0,23	254,8	134,7	3610,0	0,46	481,2	4156,3	7883
23	2,26	2,44	2,22	2,16	0,23	263,8	135,4	4500,0	0,56	367,5	5442,2	16438
24	2,33	2,29	2,31	2,71	0,24	255,2	133,8	3720,0	0,45	581,7	3438,2	5344
25	2,00	2,15	2,18	2,22	0,21	264,8	133,7	4780,0	0,63	365,0	5479,5	18965

Painel LVL 15												
lâmina	espessura (mm)				esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Dens.bás (g/cm ³)	tempo (µs)	Veloc. (m/s)	Ed (Mpa)
	1	2	3	4								
27	2,16	2,35	2,14	2,34	0,22	265,7	134,1	4640,0	0,58	369,1	5418,6	17013
28	2,46	2,44	2,21	2,14	0,23	254,5	134,9	2470,0	0,31	499,1	4007,2	4996
29	2,22	2,15	2,09	2,14	0,22	265,5	134,7	4700,0	0,61	350,2	5711,0	19937
30	2,36	2,26	2,24	2,28	0,23	254,5	135,9	2540,0	0,32	477,9	4185,0	5629
31	1,99	2,29	2,17	2,21	0,22	265,3	134,7	4870,0	0,63	364,8	5482,5	18920
32	2,10	2,36	2,21	2,42	0,23	254,8	133,6	2770,0	0,36	455,9	4386,9	6891
33	2,38	2,27	2,16	2,15	0,22	263,0	136,0	5270,0	0,66	370,4	5399,6	19177
34	2,17	2,15	2,32	2,37	0,23	254,2	134,4	2610,0	0,34	429,0	4662,0	7371
35	2,07	2,14	1,98	2,15	0,21	263,2	133,4	5030,0	0,69	348,8	5733,9	22591
36	2,15	2,23	2,08	2,05	0,21	254,8	134,9	2730,0	0,37	429,0	4662,0	8114
37	1,98	1,83	2,13	2,09	0,20	263,7	135,7	4370,0	0,61	372,7	5366,2	17518
38	2,19	2,18	2,12	2,12	0,22	254,5	132,4	2980,0	0,41	386,8	5170,6	10985
39	2,04	2,09	2,11	2,24	0,21	262,8	137,7	3920,0	0,51	468,4	4269,9	9316
40	2,22	2,20	2,15	2,46	0,23	254,5	134,5	2770,0	0,36	439,6	4549,6	7420
41	2,10	2,18	2,19	2,40	0,22	263,0	136,7	3910,0	0,49	423,0	4728,1	10964

Painel LVL 25 B												
lâmina (B)	espessura (mm)				esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Dens.bás (g/cm ³)	tempo (µs)	Veloc. (m/s)	E (Mpa)
	1	2	3	4								
1	2,40	2,55	2,07	1,92	0,22	261,5	132,6	4636,6	0,60	363,4	5503,6	18122
2	2,30	2,39	2,15	2,15	0,22	262,0	136,0	4759,7	0,59	420,8	4752,9	13426
3	2,04	2,10	2,17	2,18	0,21	262,5	133,2	4655,2	0,63	406,8	4916,4	15162
4	2,29	2,05	2,10	2,35	0,22	261,0	134,0	4714,5	0,61	378,6	5282,6	17118
5	2,08	2,12	2,26	2,10	0,21	261,0	133,0	4622,2	0,62	359,9	5557,1	19215
6	2,23	2,09	2,22	2,05	0,21	261,1	131,9	4199,1	0,57	358,8	5574,1	17641
7	2,15	2,07	2,14	2,24	0,22	263,9	134,5	4046,4	0,53	429,7	4654,4	11487
8	2,00	1,95	1,94	1,93	0,20	261,0	134,0	4225,9	0,62	368,0	5434,8	18255
9	2,23	2,30	2,06	2,06	0,22	259,0	132,5	4185,3	0,56	352,5	5673,8	18155
10	2,05	2,32	2,28	2,22	0,22	264,0	132,0	3914,5	0,51	431,9	4630,7	10662
11	2,13	2,21	2,21	2,13	0,22	263,5	134,0	3966,4	0,52	457,6	4370,6	9889
12	2,02	2,05	2,28	2,22	0,21	263,0	132,5	4030,0	0,54	480,8	4159,7	9340
13	2,18	2,15	2,29	2,14	0,22	263,5	132,5	4261,2	0,56	515,0	3883,5	8405
14	2,15	2,38	2,29	2,24	0,23	263,5	133,0	4594,5	0,58	452,8	4417,0	11292
15	1,96	2,03	2,21	2,06	0,21	264,1	133,5	3996,5	0,55	441,9	4525,9	11244
16	1,98	2,12	2,01	2,21	0,21	263,5	133,2	4170,1	0,57	420,6	4755,1	12916
17	2,10	2,17	2,09	2,04	0,21	263,5	132,0	4371,5	0,60	440,4	4541,3	12343
18	2,00	2,33	2,10	2,08	0,21	266,0	130,5	4407,2	0,60	423,9	4718,1	13284
19	2,26	2,26	2,15	2,15	0,22	264,5	131,0	4411,6	0,58	400,4	4995,0	14407
20	2,07	2,08	2,06	2,06	0,21	263,0	133,8	3504,0	0,48	411,0	4866,2	11405
21	2,06	2,07	2,06	2,12	0,21	264,2	133,0	3411,8	0,47	449,9	4445,4	9236
22	2,00	2,04	2,04	2,09	0,20	264,5	134,6	3686,0	0,51	429,7	4654,4	10981
23	2,33	2,34	2,03	2,31	0,23	262,3	134,0	3556,3	0,45	393,5	5082,6	11604
24	2,00	2,05	2,13	2,18	0,21	263,0	135,3	3751,0	0,50	379,9	5264,5	13979
25	2,11	2,18	2,08	2,13	0,21	262,0	133,5	3569,9	0,48	430,1	4650,1	10386

médio	12326
mínimo	4996
máximo	22591
d. padrão	4258
C.V. (%)	34,5

ANEXO 4

Classificação das lâminas para a confecção dos painéis LVL para os ensaios principais.

lâmina	esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Densid. (g/cm³)	Dist.perc. onda (m)	Tempo (µs)	veloc. (m/s)	C _L (MPa)	Tempo médio (µs)	Dist.perc. onda (m)	veloc. (m/s)	Ed (MPa)
1	0,21	266,7	136,9	4744	0,619	2,0	437,50	4571	12946	556	2,5	4494	12509
2	0,21	262,4	134,4	4749	0,650	2,0	433,80	4610	13811	573	2,5	4360	12354
3	0,22	265,8	136,2	4786	0,614	2,0	426,40	4690	13512	561	2,5	4456	12197
4	0,21	263,9	136,9	4860	0,641	2,0	440,90	4536	13197	564	2,5	4435	12616
5	0,20	261,4	134,5	4620	0,664	2,0	453,50	4410	12908	790	2,5	3163	6641
6	0,22	262,1	136,3	4344	0,554	2,0	515,60	3879	8335	613	2,5	4078	9214
7	0,21	263,3	137,4	4438	0,591	2,0	489,90	4082	9853	625	2,5	4002	9469
8	0,21	262,1	135,1	4300	0,587	2,0	496,40	4029	9523	607	2,5	4121	9962
9	0,20	262,3	133,6	4717	0,663	2,0	442,60	4519	13539	572	2,5	4371	12666
10	0,20	265,5	135,9	4440	0,604	2,0	456,30	4383	11603	624	2,5	4006	9694
11	0,21	263,9	136,8	4374	0,570	2,0	496,20	4031	9263	605	2,5	4132	9736
12	0,21	262,9	136,5	4369	0,579	2,0	473,70	4222	10322	601	2,5	4162	10031
13	0,20	264,9	135,8	4580	0,642	2,0	477,00	4193	11290	608	2,5	4110	10846
14	0,20	264,1	134,4	4530	0,631	2,0	477,70	4187	11061	555	2,5	4502	12788
15	0,21	264,9	132,3	4345	0,588	2,0	458,50	4362	11193	603	2,5	4146	10112
16	0,21	261,9	136,5	4456	0,601	2,0	483,40	4137	10295	578	2,5	4323	11238
17	0,21	265,4	135,9	5020	0,666	2,0	434,40	4604	14116	577	2,5	4330	12487
18	0,22	262,7	136,6	5342	0,663	2,0	448,80	4456	13168	552	2,5	4526	13585
19	0,21	264,8	134,7	4449	0,608	2,0	466,60	4286	11165	581	2,5	4303	11252
20	0,19	264,9	135,6	4035	0,586	2,0	390,00	5128	15406	516	2,5	4848	13769
21	0,19	264,1	134,6	4314	0,624	2,0	387,70	5159	16604	512	2,5	4880	14857
22	0,20	263,9	133,8	4444	0,618	2,0	388,30	5151	16407	488	2,5	5119	16209
23	0,20	265,6	131,9	4267	0,605	2,0	403,10	4962	14899	486	2,5	5148	16037
24	0,20	263,9	134,7	4494	0,619	2,0	415,30	4816	14355	521	2,5	4798	14252
25	0,21	267,1	135,1	3815	0,510	2,0	426,30	4692	11228	572	2,5	4371	9744
26	0,20	267,9	134,1	3725	0,508	2,0	446,70	4477	10176	625	2,5	4000	8122
27	0,21	267,2	135,9	3760	0,488	2,0	448,70	4457	9704	771	2,5	3243	5135
28	0,20	267,3	134,9	3834	0,520	2,0	432,40	4625	11123	610	2,5	4096	8724
29	0,20	267,1	137,8	3718	0,496	2,0	447,90	4465	9897	604	2,5	4141	8513
30	0,20	267,4	132,1	3873	0,537	2,0	430,10	4650	11622	559	2,5	4470	10737
31	0,21	267,9	135,9	3900	0,517	2,0	443,90	4506	10505	541	2,5	4624	11064
32	0,22	267,4	134,2	4495	0,558	2,0	416,70	4800	12853	504	2,5	4960	13728
33	0,22	267,4	135,6	4415	0,560	2,0	413,40	4838	13103	497	2,5	5030	14165
34	0,22	267,7	134,5	4398	0,565	2,0	434,10	4607	12004	520	2,5	4805	13054
35	0,21	266,4	134,6	4149	0,561	2,0	396,80	5040	14252	523	2,5	4780	12819
36	0,20	267,3	135,2	3996	0,547	2,0	401,70	4979	13552	540	2,5	4627	11704
37	0,21	267,2	134,9	4240	0,557	2,0	396,90	5039	14156	498	2,5	5023	14068
38	0,21	266,9	135,6	4110	0,549	2,0	391,40	5110	14325	514	2,5	4864	12978
39	0,20	266,8	134,5	4010	0,553	2,0	395,50	5057	14129	518	2,5	4826	12870
40	0,20	266,6	135,2	4000	0,548	2,0	393,00	5089	14193	520	2,5	4811	12683
41	0,21	266,7	135,5	4037	0,528	2,0	402,10	4974	13052	479	2,5	5216	14351
42	0,20	267,1	135,4	3941	0,537	2,0	394,70	5067	13800	562	2,5	4451	10648
43	0,23	267,8	135,9	4966	0,583	2,0	382,00	5236	15984	502	2,5	4980	14462
44	0,22	266,1	133,1	4281	0,548	2,0	461,50	4334	10295	490	2,5	5106	14289
45	0,20	263,9	133,2	4209	0,586	2,0	384,60	5200	15853	487	2,5	5133	15449
46	0,20	264,8	135	4289	0,588	2,0	403,00	4963	14485	484	2,5	5165	15691
47	0,21	266,4	130,8	4794	0,658	2,0	424,80	4708	14592	516	2,5	4848	15472
48	0,22	263,6	134,4	5200	0,656	2,0	443,80	4507	13322	516	2,5	4842	15379
49	0,21	265,4	136,5	5096	0,662	2,0	412,10	4853	15592	540	2,5	4630	14188
50	0,22	266,8	135,1	5441	0,680	2,0	440,80	4537	13998	507	2,5	4931	16533
51	0,21	263,8	134,6	4710	0,623	2,0	532,80	3754	8785	599	2,5	4171	10849
52	0,22	263,1	136,8	5450	0,700	2,0	381,80	5238	19214	474	2,5	5278	19506
53	0,20	263,8	134,6	5150	0,717	2,0	372,90	5363	20629	486	2,5	5141	18950
54	0,22	264,2	134,4	5106	0,665	2,0	373,00	5362	19118	478	2,5	5226	18164
55	0,21	262,1	136,2	5167	0,699	2,0	371,70	5381	20244	468	2,5	5338	19925
56	0,20	260,6	133,1	5091	0,744	2,0	380,80	5252	20526	488	2,5	5119	19502
57	0,20	262,3	136,6	5100	0,712	2,0	376,90	5306	20040	463	2,5	5403	20779
58	0,21	261,9	131,8	4930	0,678	2,0	394,90	5065	17383	464	2,5	5388	19673
59	0,21	262,6	136,2	5026	0,658	2,0	383,50	5215	17901	484	2,5	5162	17537
60	0,20	263,7	134,5	4959	0,708	2,0	368,90	5422	20808	475	2,5	5267	19638
61	0,20	262,7	135,9	5092	0,699	2,0	373,80	5350	20015	504	2,5	4960	17203
62	0,21	261,1	132,9	4612	0,631	2,0	371,40	5385	18288	465	2,5	5372	18203
63	0,20	264,2	136,6	4986	0,693	2,0	369,50	5413	20314	468	2,5	5346	19814
64	0,20	262,9	135,2	4489	0,636	2,0	378,40	5285	17774	490	2,5	5102	16562
65	0,21	260,9	134,6	4960	0,665	2,0	391,80	5105	17340	463	2,5	5403	19429
66	0,20	263,6	137,1	4448	0,603	2,0	503,90	3969	9504	617	2,5	4050	9894
67	0,21	263,5	136,8	4536	0,610	2,0	494,90	4041	9964	602	2,5	4153	10522
68	0,21	263,1	136,5	4067	0,552	2,0	504,20	3967	8681	581	2,5	4303	10216
69	0,20	263,1	134,6	4301	0,603	2,0	510,80	3915	9252	709	2,5	3528	7510
70	0,21	262,4	136,9	4569	0,618	2,0	491,10	4072	10253	610	2,5	4101	10395
71	0,21	261,2	137,1	3718	0,506	2,0	467,80	4275	9246	624	2,5	4004	8111
72	0,21	262,8	135,9	4268	0,570	2,0	482,70	4143	9793	624	2,5	4009	9166

lâmina	esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Densid. (g/cm³)	Dist.perc. onda (m)	Tempo (µs)	veloc. (m/s)	C _L (MPa)	Tempo médio (µs)	Dist.perc. onda (m)	veloc. (m/s)	Ed (MPa)
73	0,20	260,2	137,9	4330	0,595	2,0	517,70	3863	8883	601	2,5	4160	10299
74	0,21	263,8	133,4	4248	0,567	2,0	483,60	4136	9693	619	2,5	4037	9234
75	0,21	260,9	137,1	4283	0,569	2,0	534,50	3742	7964	613	2,5	4076	9451
76	0,21	262,1	137,1	4346	0,571	2,0	510,70	3916	8760	602	2,5	4153	9850
77	0,21	263,7	135,6	4327	0,572	2,0	526,70	3797	8250	627	2,5	3989	9106
78	0,22	262,1	136,4	4358	0,559	2,0	513,90	3892	8469	626	2,5	3994	8918
79	0,21	263,5	137,9	4665	0,620	2,0	499,80	4002	9931	896	2,5	2789	4825
80	0,21	264,1	134,2	4061	0,546	2,0	488,80	4092	9135	626	2,5	3991	8693
81	0,22	263,1	137	3790	0,486	2,0	512,00	3906	7411	621	2,5	4024	7863
82	0,21	263,9	137,9	4570	0,610	2,0	521,00	3839	8994	809	2,5	3089	5824
83	0,22	262,4	135,9	4745	0,607	2,0	492,70	4059	10000	610	2,5	4101	10205
84	0,22	262,4	136,7	4886	0,621	2,0	484,90	4125	10569	601	2,5	4157	10738
85	0,22	263,9	136,4	4809	0,610	2,0	474,90	4211	10820	624	2,5	4004	9781
86	0,20	257,8	137,2	3530	0,506	2,0	550,80	3631	6671	673	2,5	3715	6982
87	0,20	259,5	137,3	3594	0,502	2,0	541,50	3693	6846	881	2,5	2838	4041
88	0,20	257,1	137,6	3578	0,498	2,0	523,50	3820	7263	686	2,5	3646	6615
89	0,20	261,6	138,4	3619	0,497	2,0	588,30	3400	5740	687	2,5	3639	6577
90	0,20	260,2	137,4	3620	0,495	2,0	549,40	3640	6562	689	2,5	3628	6519
91	0,20	260,3	134,9	3504	0,487	2,0	538,90	3711	6713	688	2,5	3635	6441
92	0,20	261,1	137,6	3649	0,500	2,0	539,90	3704	6857	657	2,5	3803	7228
93	0,20	259,9	137,7	3688	0,517	2,0	548,80	3644	6860	683	2,5	3662	6927
94	0,20	295,9	137,9	3643	0,436	2,0	517,80	3862	6505	712	2,5	3510	5371
95	0,21	262,2	135,9	3567	0,487	2,0	573,60	3487	5915	907	2,5	2755	3694
96	0,20	259,4	134,5	3597	0,505	2,0	526,90	3796	7273	721	2,5	3466	6063
97	0,21	260,9	136,8	3706	0,502	2,0	512,30	3904	7645	689	2,5	3630	6611
98	0,20	261,1	137,1	3556	0,492	2,0	578,80	3455	5872	720	2,5	3471	5924
99	0,21	261,9	138,3	3578	0,481	2,0	587,30	3405	5581	674	2,5	3709	6622
100	0,21	259,1	139,8	3718	0,484	2,0	537,60	3720	6693	711	2,5	3518	5985
101	0,20	259,2	138,1	3349	0,461	2,0	518,60	3857	6855	656	2,5	3809	6687
102	0,20	260,8	137,4	3619	0,498	2,0	594,60	3364	5636	683	2,5	3660	6674
103	0,21	261,8	134,5	3514	0,460	2,0	577,90	3461	5746	680	2,5	3675	6479
104	0,20	262,1	136,9	3517	0,482	2,0	523,10	3823	7041	715	2,5	3498	5894
105	0,20	262,9	140,1	3699	0,495	2,0	531,80	3761	7006	700	2,5	3571	6318
106	0,20	260,4	138,3	3597	0,494	2,0	526,90	3796	7124	713	2,5	3505	6073
107	0,21	258,4	135,7	3691	0,505	2,0	518,70	3856	7515	650	2,5	3848	7485
108	0,22	259,9	139,8	3880	0,496	2,0	523,50	3820	7241	667	2,5	3750	6977
109	0,22	262,1	136,3	3758	0,488	2,0	575,50	3475	5889	684	2,5	3653	6507
110	0,22	261,9	136,1	3740	0,487	2,0	556,90	3591	6287	676	2,5	3696	6660
111	0,22	258,1	139,8	3226	0,405	2,0	452,90	4416	7898	512	2,5	4886	9669
112	0,21	259,4	134,2	5245	0,707	2,0	391,60	5107	18429	532	2,5	4702	15622
113	0,22	259,2	133,1	4758	0,638	2,0	425,40	4701	14113	681	2,5	3673	8613
114	0,21	258,8	138,4	3212	0,420	2,0	418,80	4776	9579	564	2,5	4430	8243
115	0,20	258,7	138,3	3436	0,480	2,0	386,80	5171	12822	524	2,5	4771	10916
116	0,21	258,9	139,8	3355	0,444	2,0	400,70	4991	11049	515	2,5	4858	10465
117	0,20	259,1	140,2	3464	0,466	2,0	451,10	4434	9155	490	2,5	5099	12107
118	0,20	258,8	140,6	4475	0,613	2,0	426,60	4688	13482	490	2,5	5102	15967
119	0,21	258,8	139,8	3940	0,527	2,0	446,90	4475	10562	496	2,5	5044	13415
120	0,21	259,2	137,5	4848	0,656	2,0	493,50	4053	10780	471	2,5	5304	18465
121	0,21	258,8	139,6	3600	0,481	2,0	399,70	5004	12038	541	2,5	4618	10254
122	0,21	258,9	139,9	4170	0,550	2,0	522,50	3828	8061	487	2,5	5137	14519
123	0,21	259,1	139,5	4609	0,603	2,0	423,50	4723	13446	479	2,5	5219	16423
124	0,21	255,4	137,2	4357	0,598	2,0	380,90	5251	16481	497	2,5	5027	15105
125	0,20	255,3	137,9	4300	0,608	2,0	368,90	5422	17861	516	2,5	4848	14282
126	0,20	255,5	137,9	4287	0,611	2,0	354,30	5645	19459	455	2,5	5499	18463
127	0,20	255,7	139,6	4703	0,654	2,0	345,60	5787	21898	475	2,5	5259	18087
128	0,20	256,4	139,1	4363	0,603	2,0	455,00	4396	11643	556	2,5	4496	12184
129	0,20	255,4	137,9	4239	0,591	2,0	443,50	4510	12013	535	2,5	4673	12899
130	0,21	255,5	139,3	5659	0,745	2,0	390,10	5127	19575	522	2,5	4786	17060
131	0,20	255,2	138,8	5062	0,703	2,0	418,80	4776	16035	513	2,5	4876	16720
132	0,20	255,1	135,7	4762	0,673	2,0	386,60	5173	18003	488	2,5	5123	17654
133	0,21	254,8	136,4	4730	0,640	2,0	583,90	3425	7505	469	2,5	5334	18202
134	0,21	255,3	138,1	4478	0,594	2,0	368,90	5422	17465	470	2,5	5319	16812
135	0,21	255,4	138,7	4464	0,614	2,0	389,50	5135	16188	463	2,5	5400	17900
136	0,20	255,4	132,4	4549	0,658	2,0	382,40	5230	17994	497	2,5	5034	16667
137	0,22	255,1	136,8	4596	0,597	2,0	373,80	5350	17098	530	2,5	4720	13306
138	0,20	255,1	136,3	4453	0,631	2,0	394,50	5070	16215	489	2,5	5109	16467
139	0,20	255,2	138,4	4626	0,656	2,0	399,80	5003	16409	481	2,5	5201	17738
140	0,20	255,1	138,7	4751	0,676	2,0	399,60	5005	16924	491	2,5	5088	17491
141	0,20	255,4	135,7	4521	0,650	2,0	394,40	5071	16710	474	2,5	5278	18101
142	0,21	255,2	133,1	4499	0,640	2,0	393,80	5079	16504	481	2,5	5194	17261
143	0,21	255,4	137,8	4781	0,647	2,0	370,90	5392	18809	509	2,5	4908	15585
144	0,20	255,3	137,9	4589	0,641	2,0	409,80	4880	15256	470	2,5	5319	18123

lâmina	esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Densid. (g/cm ³)	Dist.perc. onda (m)	Tempo (µs)	veloc. (m/s)	C _L (MPa)	Tempo médio (µs)	Dist.perc. onda (m)	veloc. (m/s)	Ed (MPa)
145	0,21	255,5	133,4	4439	0,617	2,0	391,30	5111	16106	474	2,5	5271	17126
146	0,20	255,2	138,2	4619	0,661	2,0	375,70	5323	18721	500	2,5	5003	16537
147	0,20	255,2	138,4	4578	0,655	2,0	382,40	5230	17929	489	2,5	5109	17109
148	0,20	255,3	137,9	4596	0,651	2,0	379,80	5266	18055	477	2,5	5237	17860
149	0,20	255,2	136,1	4598	0,657	2,0	421,80	4742	14771	491	2,5	5092	17032
150	0,21	255,2	138,4	4645	0,635	2,0	372,90	5363	18276	472	2,5	5293	17798
151	0,20	255,2	137,6	4545	0,646	2,0	416,70	4800	14889	473	2,5	5289	18081
152	0,20	255,4	136,8	4832	0,707	2,0	396,00	5051	18021	515	2,5	4851	16627
153	0,21	254,9	137,9	4827	0,666	2,0	409,60	4883	15874	494	2,5	5061	17052
154	0,20	255,4	137,1	4193	0,601	2,0	377,80	5294	16842	485	2,5	5151	15947
155	0,20	255,3	137,5	4176	0,585	2,0	388,00	5155	15532	492	2,5	5081	15094
156	0,20	255,4	136,4	4269	0,606	2,0	389,00	5141	16016	494	2,5	5064	15539
157	0,20	255,3	137,9	4472	0,642	2,0	392,20	5099	16683	486	2,5	5144	16976
158	0,20	255,3	137,8	4455	0,636	2,0	387,10	5167	16987	487	2,5	5130	16746
159	0,20	255,3	137,7	4581	0,654	2,0	395,50	5057	16724	482	2,5	5190	17618
160	0,20	255,3	138,8	4609	0,667	2,0	416,60	4801	15373	487	2,5	5137	17601
161	0,20	255,3	137,1	4334	0,628	2,0	381,50	5242	17253	482	2,5	5187	16888
162	0,20	255,3	137,2	4597	0,671	2,0	405,50	4932	16331	489	2,5	5112	17546
163	0,20	255,3	138,3	4532	0,653	2,0	393,00	5089	16917	487	2,5	5137	17237
164	0,20	255,2	138,1	4616	0,664	2,0	403,70	4954	16297	491	2,5	5088	17191
165	0,20	255,2	137,2	4584	0,663	2,0	399,00	5013	16655	481	2,5	5188	17907
166	0,20	255,2	139,4	4652	0,646	2,0	399,70	5004	16168	483	2,5	5180	17324
167	0,19	255,4	138,1	4621	0,673	2,0	402,00	4975	16651	495	2,5	5054	17183
168	0,20	255,2	138,4	4697	0,667	2,0	408,60	4895	15971	497	2,5	5030	16867
169	0,20	255,9	138,2	3677	0,517	2,0	411,50	4860	12204	564	2,5	4430	10139
170	0,21	255,9	139,9	4744	0,634	2,0	382,70	5226	17316	522	2,5	4786	14524
171	0,21	258,3	139,7	4518	0,610	2,0	390,90	5116	15969	524	2,5	4771	13885
172	0,21	259,6	140,9	4139	0,539	2,0	439,10	4555	11192	673	2,5	3715	7444
173	0,21	258,9	137,2	4820	0,662	2,0	366,90	5451	19669	470	2,5	5319	18728
174	0,21	259,2	138,8	4763	0,643	2,0	368,30	5430	18975	474	2,5	5271	17874
175	0,20	259,2	136,9	4828	0,678	2,0	359,80	5559	20942	481	2,5	5201	18334
176	0,20	259,1	137,8	4762	0,661	2,0	368,70	5424	19452	481	2,5	5198	17859
177	0,21	260,2	138,1	4853	0,641	2,0	363,30	5505	19421	479	2,5	5219	17456
178	0,21	259,1	139,4	4871	0,651	2,0	368,60	5426	19158	465	2,5	5372	18782
179	0,20	259,1	138,7	4771	0,662	2,0	356,10	5616	20887	456	2,5	5482	19902
180	0,20	259,1	136,8	4733	0,666	2,0	351,20	5695	21598	454	2,5	5507	20195
181	0,20	258,8	138,9	4828	0,677	2,0	357,70	5591	21153	464	2,5	5392	19670
182	0,20	259,4	139,2	5009	0,692	2,0	372,70	5366	19924	472	2,5	5297	19410
183	0,20	259,1	134,7	5069	0,735	2,0	380,90	5251	20275	461	2,5	5427	21658
184	0,20	259	138,1	5368	0,737	2,0	367,90	5436	21768	466	2,5	5361	21169
185	0,20	258,9	139,8	4369	0,594	2,0	387,40	5163	15829	482	2,5	5187	15977
186	0,21	259,1	140,9	4441	0,591	2,0	423,90	4718	13145	470	2,5	5315	16684
187	0,21	260,5	140,1	4177	0,558	2,0	406,90	4915	13472	501	2,5	4993	13903
188	0,21	258,8	137,8	4191	0,572	2,0	410,50	4872	13575	502	2,5	4977	14164
189	0,20	259,1	140,9	4347	0,587	2,0	375,50	5326	16640	468	2,5	5346	16762
190	0,20	259,3	139,2	4349	0,617	2,0	381,70	5240	16942	499	2,5	5010	15489
191	0,20	259,1	140,2	4355	0,598	2,0	438,80	4558	12422	480	2,5	5205	16198
192	0,20	254,9	141,1	3590	0,505	2,0	500,50	3996	8060	567	2,5	4407	9801
193	0,20	255,4	137,8	4232	0,589	2,0	387,80	5157	15659	481	2,5	5201	15926
194	0,20	255,3	136,7	4129	0,587	2,0	379,50	5270	16307	499	2,5	5010	14738
195	0,20	255,3	136,9	4215	0,593	2,0	385,50	5188	15971	483	2,5	5172	15874
196	0,20	255,3	138,1	4363	0,615	2,0	397,10	5037	15598	474	2,5	5274	17105
197	0,20	255,1	138,4	4093	0,577	2,0	387,70	5159	15349	491	2,5	5088	14932
198	0,20	255,2	138,3	4276	0,605	2,0	378,60	5283	16883	489	2,5	5112	15813
199	0,20	255,3	138,6	4458	0,628	2,0	374,90	5335	17861	472	2,5	5300	17631
200	0,20	255,2	137,5	4307	0,614	2,0	371,10	5389	17848	490	2,5	5102	15995
201	0,20	255,1	137,7	4300	0,608	2,0	383,60	5214	16534	488	2,5	5123	15964
202	0,21	255,4	138,9	4206	0,565	2,0	386,60	5173	15128	509	2,5	4908	13618
203	0,21	254,9	138,6	4171	0,558	2,0	386,90	5169	14899	499	2,5	5010	13995
204	0,20	255,3	139,8	4456	0,629	2,0	380,50	5256	17377	474	2,5	5274	17496
205	0,23	255,3	139,4	4732	0,590	2,0	379,20	5274	16421	493	2,5	5074	15200
206	0,21	255,1	138,1	4509	0,611	2,0	429,50	4657	13247	508	2,5	4918	14777
207	0,21	255,1	141,1	4358	0,583	2,0	404,80	4941	14226	489	2,5	5116	15253
208	0,20	255,4	137,9	3818	0,549	2,0	401,20	4985	13640	500	2,5	5000	13722
209	0,20	255,1	138,6	3900	0,539	2,0	409,20	4888	12869	494	2,5	5057	13779
210	0,20	255,1	138,9	3972	0,564	2,0	443,20	4513	11485	488	2,5	5119	14782
211	0,20	255,2	138,5	4158	0,588	2,0	446,40	4480	11807	482	2,5	5183	15802
212	0,20	255,4	138,9	4231	0,603	2,0	367,90	5436	17824	514	2,5	4867	14286
213	0,20	255,2	138,8	4337	0,602	2,0	388,80	5144	15940	478	2,5	5234	16501
214	0,21	255,1	139,6	4271	0,579	2,0	445,30	4491	11687	501	2,5	4987	14408
215	0,20	258,8	137,7	2870	0,402	2,0	409,20	4888	9607	492	2,5	5085	10398
216	0,20	259,1	133,4	3442	0,497	2,0	467,90	4274	9075	524	2,5	4771	11306

lãmينا	esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Densid. (g/cm³)	Dist.perc. onda (m)	Tempo (μs)	veloc. (m/s)	C _L (MPa)	Tempo médico (μs)	Dist.perc. onda (m)	veloc. (m/s)	Ed (MPa)	
217	0,20	259,1	131,1	3151	0,463	2,0	396,00	5051	11816		485	2,5	5158	12325
218	0,21	258,9	136,7	4074	0,561	2,0	361,70	5529	17147		478	2,5	5234	15363
219	0,20	258,8	135,4	3704	0,523	2,0	415,50	4813	12109		477	2,5	5237	14336
220	0,20	258,9	133,2	3348	0,481	2,0	403,90	4952	11799		480	2,5	5212	13072
221	0,20	258,9	135,9	4299	0,607	2,0	366,90	5451	18040		460	2,5	5435	17933
222	0,20	258,9	137,4	3909	0,539	2,0	372,90	5363	15514		548	2,5	4559	11211
223	0,20	258,9	135,7	4293	0,612	2,0	365,50	5472	18317		478	2,5	5226	16710
224	0,19	258,9	134,7	4241	0,624	2,0	369,20	5417	18324		477	2,5	5241	17153
225	0,20	258,9	136,9	4309	0,612	2,0	364,60	5485	18406		485	2,5	5151	16231
226	0,20	258,9	137,5	4402	0,621	2,0	373,90	5349	17757		485	2,5	5158	16512
227	0,20	259	135,7	4247	0,601	2,0	402,80	4965	14821		462	2,5	5415	17629
228	0,20	258,8	136,2	4414	0,622	2,0	376,80	5308	17530		509	2,5	4908	14991
229	0,21	258,9	137,9	4420	0,600	2,0	450,90	4436	11795		460	2,5	5435	17708
230	0,21	259,2	140	5094	0,679	2,0	436,80	4579	14235		520	2,5	4805	15674
231	0,21	258,4	138,2	4959	0,673	2,0	428,70	4665	14654		511	2,5	4889	16094
232	0,21	258	136,9	5019	0,684	2,0	426,70	4687	15027		525	2,5	4765	15530
233	0,21	259,6	138,1	5034	0,662	2,0	410,80	4869	15699		528	2,5	4735	14849
234	0,26	257,9	136,7	6973	0,772	2,0	542,90	3684	10475		539	2,5	4641	16626
235	0,20	258,9	137,6	4817	0,672	2,0	388,70	5145	17788		524	2,5	4771	15294
236	0,21	258,9	136,9	5089	0,676	2,0	431,10	4639	14543		517	2,5	4839	15820
237	0,21	258,4	138,2	5466	0,743	2,0	400,20	4998	18557		530	2,5	4717	16532
238	0,18	257,6	138,2	5608	0,893	2,0	413,00	4843	20930		528	2,5	4735	20009
239	0,21	259,8	138,2	4202	0,550	2,0	388,50	5148	14579		530	2,5	4714	12224
240	0,21	259,8	138,4	4431	0,591	2,0	415,00	4819	13727		483	2,5	5172	15813
241	0,20	258,7	137,8	4473	0,613	2,0	383,80	5211	16641		471	2,5	5304	17241
242	0,22	259,1	137,6	3931	0,513	2,0	405,60	4931	12469		494	2,5	5064	13152
243	0,21	259,9	137,6	4408	0,584	2,0	388,30	5151	15497		509	2,5	4908	14074
244	0,22	259,1	137,7	4530	0,578	2,0	376,90	5306	16270		471	2,5	5308	16278
245	0,21	259,1	138,1	4624	0,612	2,0	376,60	5311	17253		466	2,5	5361	17581
246	0,21	258,9	136,8	4653	0,635	2,0	384,90	5196	17157		467	2,5	5350	18184
247	0,21	260	137,4	5155	0,689	2,0	390,30	5124	18086		499	2,5	5007	17266
248	0,21	259,4	136,3	5121	0,691	2,0	393,20	5086	17866		473	2,5	5285	19291
249	0,20	259,1	135,9	5121	0,716	2,0	425,50	4700	15828		484	2,5	5162	19088
250	0,22	252,3	134,2	4696	0,619	2,0	355,50	5626	19597		440	2,5	5678	19958
251	0,21	255,3	133	4685	0,667	2,0	424,90	4707	14786		539	2,5	4638	14357
252	0,20	255,1	134,6	4733	0,698	2,0	414,60	4824	16241		526	2,5	4753	15766
253	0,19	255,6	133,8	4259	0,648	2,0	384,50	5202	17526		543	2,5	4601	13714
254	0,20	254,9	133,4	4022	0,591	2,0	408,80	4892	14138		541	2,5	4618	12598
255	0,20	255,1	135,9	4127	0,587	2,0	399,40	5008	14723		568	2,5	4399	11361
256	0,21	255,2	132,8	4008	0,568	2,0	475,40	4207	10051		520	2,5	4808	13126
257	0,21	255,2	132,4	4043	0,572	2,0	397,20	5035	14498		523	2,5	4780	13066
258	0,21	255	134,5	4543	0,631	2,0	435,90	4588	13278		539	2,5	4641	13586
259	0,21	255,1	133,2	4287	0,615	2,0	387,50	5161	16395		481	2,5	5194	16602
260	0,20	255,2	133,7	4238	0,623	2,0	394,50	5070	16002		518	2,5	4826	14502
261	0,21	255,2	135,5	4279	0,592	2,0	382,10	5234	16221		509	2,5	4912	14283
262	0,20	254,9	129,5	4424	0,670	2,0	403,50	4957	16463		455	2,5	5495	20230
263	0,20	255,2	135,4	4532	0,658	2,0	377,90	5292	18437		487	2,5	5133	17347
264	0,20	255,5	133,3	4362	0,655	2,0	359,90	5557	20231		490	2,5	5102	17053
265	0,20	255,1	133,2	4651	0,685	2,0	393,30	5085	17720		528	2,5	4738	15382
266	0,21	255,1	133,3	4183	0,574	2,0	395,00	5063	14719		505	2,5	4950	14071
267	0,22	254,9	132,6	4108	0,544	2,0	393,90	5077	14035		523	2,5	4777	12424
268	0,21	254,9	134,1	4196	0,585	2,0	432,70	4622	12488		501	2,5	4993	14575
269	0,21	255	132,6	4136	0,597	2,0	458,70	4360	11343		470	2,5	5323	16906
270	0,22	255,1	133,6	4304	0,587	2,0	375,70	5323	16645		538	2,5	4647	12683
271	0,21	255,1	133,7	4097	0,568	2,0	465,50	4296	10484		475	2,5	5267	15755
272	0,20	255,1	133,4	4259	0,616	2,0	426,70	4687	13528		520	2,5	4805	14214
273	0,20	255,1	133,2	4144	0,600	2,0	451,20	4433	11790		495	2,5	5047	15285
274	0,20	255,1	133,1	4200	0,607	2,0	417,70	4788	13919		500	2,5	4997	15157
275	0,20	255,1	132,4	4246	0,625	2,0	370,30	5401	18222		504	2,5	4957	15349
276	0,21	255,1	132,2	4290	0,607	2,0	433,80	4610	12907		542	2,5	4615	12934
277	0,21	255,1	132,6	4354	0,603	2,0	430,90	4641	12988		492	2,5	5085	15587
278	0,20	255,1	133,6	4248	0,609	2,0	403,50	4957	14956		467	2,5	5350	17421
279	0,20	255,5	135,8	4936	0,719	2,0	461,30	4336	13523		538	2,5	4650	15553
280	0,20	255,4	136,6	5128	0,721	2,0	410,90	4867	17091		526	2,5	4753	16296
281	0,20	255,6	134,9	5137	0,735	2,0	431,90	4631	15757		541	2,5	4624	15711
282	0,22	255,4	137,1	5486	0,699	2,0	454,50	4400	13544		532	2,5	4702	15465
283	0,21	255,5	133	5128	0,725	2,0	478,10	4183	12681		540	2,5	4630	15531
284	0,20	255,3	135,5	5153	0,729	2,0	418,90	4774	16624		538	2,5	4644	15728
285	0,21	254,6	138,9	3740	0,514	2,0	384,70	5199	13893		474	2,5	5278	14319
286	0,20	256,7	130,7	3858	0,574	2,0	471,70	4240	10310		463	2,5	5403	16745
287	0,20	254,8	131,6	3842	0,587	2,0	386,80	5171	15689		488	2,5	5123	15401
288	0,21	254,9	131,4	3637	0,521	2,0	396,90	5039	13224		516	2,5	4848	12241

lâmina	esp.média	altura	largura	massa	Densid.	Dist.perc.	Tempo	veloc.	C _L	Tempo	Dist.perc.	veloc.	Ed
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(g)	(g/cm ³)	onda (m)	(µs)	(m/s)	(MPa)	médio (µs)	onda (m)	(m/s)	(MPa)
289	0,21	254,8	131,3	3402	0,477	2,0	410,10	4877	11341	524	2,5	4771	10854
290	0,21	254,8	134	3362	0,466	2,0	416,60	4801	10743	528	2,5	4732	10437
291	0,20	254,6	131,9	3874	0,571	2,0	391,30	5111	14919	484	2,5	5169	15258
292	0,21	254,3	132,1	3833	0,536	2,0	377,50	5298	15054	490	2,5	5102	13961
293	0,21	254,7	132,3	3881	0,548	2,0	376,00	5319	15499	484	2,5	5162	14595
294	0,21	254,4	132,7	4135	0,585	2,0	384,50	5202	15838	464	2,5	5392	17017
295	0,21	254,9	132,1	3920	0,568	2,0	370,80	5394	16521	474	2,5	5274	15797
296	0,21	254,8	130,6	3800	0,544	2,0	383,90	5210	14759	471	2,5	5308	15320
297	0,21	254,1	128,6	4479	0,665	2,0	405,50	4932	16167	518	2,5	4826	15480
298	0,21	254,5	132,9	4000	0,573	2,0	377,90	5292	16041	461	2,5	5423	16842
299	0,20	254,5	132,9	4491	0,653	2,0	479,30	4173	11375	602	2,5	4151	11254
300	0,21	255,1	130,8	4722	0,676	2,0	371,80	5379	19570	471	2,5	5308	19054
301	0,21	255,1	130,8	4748	0,684	2,0	396,50	5044	17406	452	2,5	5535	20959
302	0,21	254,2	131,7	4605	0,648	2,0	407,90	4903	15580	498	2,5	5020	16332
303	0,20	255	130	4179	0,624	2,0	377,70	5295	17499	505	2,5	4954	15315
304	0,19	255	135	4299	0,643	2,0	389,90	5130	16916	496	2,5	5037	16310
305	0,20	255	136,1	4267	0,623	2,0	385,50	5188	16777	486	2,5	5148	16516
306	0,19	255	132,1	4263	0,653	2,0	372,30	5372	18850	509	2,5	4915	15778
307	0,20	255,1	131,7	5032	0,745	2,0	406,40	4921	18047	780	2,5	3204	7648
308	0,21	255,3	135,4	5140	0,716	2,0	381,10	5248	19712	521	2,5	4798	16480
309	0,20	255,4	131,2	4953	0,723	2,0	411,90	4856	17041	595	2,5	4199	12746
310	0,21	255,2	131,8	5013	0,717	2,0	442,40	4521	14662	683	2,5	3659	9602
311	0,20	255,1	129,1	4926	0,737	2,0	434,10	4607	15640	479	2,5	5216	20043
312	0,20	255,1	131	5027	0,738	2,0	404,90	4939	18013	568	2,5	4401	14303
313	0,20	255,2	128,3	4895	0,732	2,0	382,80	5225	19980	563	2,5	4440	14433
314	0,21	255,1	129,7	4938	0,702	2,0	477,90	4185	12301	547	2,5	4573	14688
315	0,20	255,8	131,3	4662	0,692	2,0	396,60	5043	17605	487	2,5	5130	18219
316	0,21	255,7	130,2	4417	0,646	2,0	354,00	5650	20633	452	2,5	5527	19745
317	0,20	255,5	130,1	4310	0,641	2,0	551,50	3626	8431	624	2,5	4004	10279
318	0,21	255,7	130,1	4335	0,632	2,0	486,80	4108	10665	621	2,5	4024	10229
319	0,23	255,6	129,7	5036	0,663	2,0	537,80	3719	9164	624	2,5	4009	10648
320	0,21	255,9	130,5	4154	0,581	2,0	481,10	4157	10045	620	2,5	4030	9441
321	0,19	255,9	128,2	4776	0,757	2,0	435,30	4595	15985	460	2,5	5435	22367
322	0,21	255,3	130,6	5006	0,707	2,0	363,60	5501	21377	426	2,5	5873	24371
323	0,20	255,3	130,7	5024	0,746	2,0	358,80	5574	23188	453	2,5	5515	22696
324	0,21	258,3	136,2	4653	0,622	2,0	410,70	4870	14760	477	2,5	5245	17121
325	0,20	258,7	136,1	4756	0,664	2,0	383,70	5212	18034	491	2,5	5092	17208
326	0,21	259,1	136,9	6483	0,866	2,0	399,80	5003	21677	510	2,5	4899	20787
327	0,21	254,9	134,9	3807	0,517	2,0	358,80	5574	16056	497	2,5	5034	13093
328	0,21	255,1	133,3	3913	0,536	2,0	451,00	4435	10550	472	2,5	5293	15029
329	0,21	255,4	132,5	3778	0,520	2,0	480,40	4163	9010	501	2,5	4987	12928
330	0,21	255,4	130	3725	0,524	2,0	456,80	4378	10038	470	2,5	5315	14795
331	0,20	255,2	133,6	3920	0,564	2,0	372,60	5368	16258	487	2,5	5130	14850
332	0,20	255,2	132,9	3947	0,578	2,0	388,50	5148	15325	455	2,5	5490	17432
333	0,20	255,8	131,7	3988	0,588	2,0	371,70	5381	17030	492	2,5	5085	15208
334	0,20	255,2	134	3997	0,572	2,0	417,20	4794	13151	472	2,5	5297	16054
335	0,20	255	131,5	3936	0,595	2,0	368,90	5422	17491	465	2,5	5376	17201
336	0,21	255	133,2	3974	0,567	2,0	349,50	5722	18576	492	2,5	5078	14627
337	0,20	254,9	133,9	4078	0,586	2,0	397,90	5026	14797	468	2,5	5346	16737
338	0,20	255,1	132,9	4684	0,690	2,0	378,00	5291	19315	488	2,5	5119	18082
339	0,21	255,4	130,6	4765	0,682	2,0	469,50	4260	12374	478	2,5	5226	18627
340	0,22	255	131,7	4843	0,657	2,0	374,10	5346	18778	454	2,5	5511	19951
341	0,20	255,1	133,2	4566	0,665	2,0	382,50	5229	18187	461	2,5	5427	19592
342	0,22	255,3	132,8	4934	0,675	2,0	368,00	5435	19947	471	2,5	5308	19026
343	0,21	255,1	133,9	4635	0,654	2,0	367,50	5442	19368	458	2,5	5455	19456
344	0,21	255,2	132,2	4562	0,656	2,0	366,30	5460	19569	463	2,5	5403	19165
345	0,20	255,6	135,2	3659	0,522	2,0	428,00	4673	11403	566	2,5	4417	10189
346	0,19	255,4	132,3	4637	0,707	2,0	401,80	4978	17526	534	2,5	4682	15504
347	0,20	254,9	135	4456	0,634	2,0	346,70	5769	21098	427	2,5	5855	21732
348	0,21	254,9	130,1	3976	0,575	2,0	356,50	5610	18098	452	2,5	5531	17591
349	0,21	255,1	132,8	4267	0,589	2,0	349,80	5718	19241	446	2,5	5601	18466
350	0,20	254,9	131,1	4238	0,644	2,0	349,80	5718	21045	430	2,5	5809	21727
351	0,20	255,1	132,1	4143	0,609	2,0	359,20	5568	18869	449	2,5	5572	18897
352	0,20	255	132,8	4123	0,607	2,0	365,50	5472	18182	457	2,5	5470	18172
353	0,20	255	132,8	4034	0,602	2,0	369,50	5413	17626	446	2,5	5610	18932
354	0,20	255	132,6	3877	0,571	2,0	361,60	5531	17473	444	2,5	5626	18081
355	0,21	254,9	134,2	3847	0,541	2,0	368,70	5424	15928	453	2,5	5515	16463
356	0,20	255	130,6	3875	0,570	2,0	361,70	5529	17418	445	2,5	5622	18007
357	0,21	255,1	132,6	4149	0,591	2,0	351,70	5687	19116	441	2,5	5699	18997
358	0,21	255	132,4	4408	0,621	2,0	364,40	5488	18706	432	2,5	5783	20764
359	0,20	255	133	3921	0,572	2,0	370,80	5394	16630	450	2,5	5556	17643
360	0,22	255,1	132,3	4491	0,616	2,0	351,60	5688	19933	439	2,5	5699	20009

lâmina	esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Densid. (g/cm³)	Dist.perc. onda (m)	Tempo (µs)	veloc. (m/s)	C _L (MPa)	Tempo médio (µs)	Dist.perc. onda (m)	veloc. (m/s)	Ed (MPa)
361	0,21	255,1	133,4	4371	0,603	2,0	351,50	5690	19523				19826
362	0,21	255	131,2	4314	0,602	2,0	369,40	5414	17642	441	2,5	5673	19371
363	0,21	255	131,5	4267	0,608	2,0	377,70	5295	17051	450	2,5	5551	18741
364	0,21	255,1	132,4	4321	0,612	2,0	368,80	5423	18002	450	2,5	5551	18865
365	0,22	255,4	131,9	4156	0,566	2,0	454,60	4399	10954	474	2,5	5278	15765
366	0,21	254,7	133,4	3149	0,440	2,0	380,90	5251	12139	551	2,5	4537	9064
367	0,20	254,9	130,9	4093	0,600	2,0	386,50	5175	16062	476	2,5	5248	16523
368	0,21	254,9	134,7	4334	0,597	2,0	417,30	4793	13709	462	2,5	5415	17501
369	0,21	254,9	134,1	3418	0,477	2,0	399,30	5009	11960	530	2,5	4717	10607
370	0,21	254,9	133,3	4268	0,610	2,0	373,90	5349	17468	477	2,5	5245	16793
371	0,20	255,4	131,9	3246	0,473	2,0	435,10	4597	10005	482	2,5	5183	12720
372	0,22	255,2	135,7	3936	0,522	2,0	476,10	4201	9211	499	2,5	5010	13101
373	0,22	255,4	135,4	3776	0,493	2,0	413,40	4838	11538	506	2,5	4944	12050
374	0,21	255,9	136,5	4494	0,624	2,0	395,50	5057	15952	508	2,5	4924	15127
375	0,21	255,7	136,3	4587	0,642	2,0	380,90	5251	17701	473	2,5	5285	17935
376	0,21	255,8	136,1	4599	0,620	2,0	359,50	5563	19195	460	2,5	5439	18345
377	0,20	255,7	136,4	4659	0,674	2,0	372,00	5376	19476	463	2,5	5403	19673
378	0,20	255,9	137,4	4594	0,638	2,0	385,70	5185	17158	465	2,5	5376	18445
379	0,21	255,7	135,2	4496	0,618	2,0	378,80	5280	17223	492	2,5	5081	15952
380	0,21	255,8	135,1	4555	0,622	2,0	376,30	5315	17583	461	2,5	5419	18279
381	0,21	255,6	135,9	4500	0,630	2,0	386,50	5175	16860	474	2,5	5274	17515
382	0,20	255,9	134,9	4722	0,691	2,0	421,00	4751	15591	495	2,5	5051	17622
383	0,21	255,6	135,6	4774	0,669	2,0	433,40	4615	14256	494	2,5	5057	17122
384	0,20	255,9	134,3	4725	0,678	2,0	416,80	4798	15613	490	2,5	5102	17652
385	0,19	256,3	133,9	4627	0,704	2,0	382,30	5231	19269	524	2,5	4774	16046
386	0,21	256,1	135,3	4795	0,674	2,0	372,80	5365	19405	512	2,5	4886	16095
387	0,20	255,6	135,4	4551	0,647	2,0	385,80	5184	17387	526	2,5	4756	14634
388	0,20	255,6	134,4	4581	0,671	2,0	415,90	4809	15516	507	2,5	4934	16335
389	0,21	255,9	135,8	4490	0,611	2,0	364,40	5488	18402	513	2,5	4873	14508
390	0,20	256,1	135,6	4605	0,661	2,0	394,80	5066	16952	484	2,5	5165	17624
391	0,20	256,2	136,1	4474	0,653	2,0	439,70	4549	13510	479	2,5	5216	17762
392	0,20	255,8	134,1	4371	0,642	2,0	389,00	5141	16969	508	2,5	4924	15567
393	0,21	255,9	133,3	4339	0,612	2,0	405,50	4932	14895	502	2,5	4980	15185
394	0,20	255,8	135,1	4326	0,614	2,0	380,30	5259	16971	523	2,5	4780	14021
395	0,21	256,1	134,8	4390	0,618	2,0	452,00	4425	12101	474	2,5	5278	17217
396	0,20	255,9	134,5	4300	0,613	2,0	418,60	4778	13997	490	2,5	5099	15940
397	0,20	255,9	135,2	4299	0,611	2,0	440,40	4541	12593	502	2,5	4983	15164
398	0,20	255,5	132,1	4884	0,722	2,0	488,60	4093	12093	504	2,5	4964	17781
399	0,20	255,9	136,9	4970	0,706	2,0	437,90	4567	14723	503	2,5	4973	17458
400	0,22	255,4	135,9	5386	0,702	2,0	423,90	4718	15630	496	2,5	5037	17814
401	0,21	255,4	135,1	5235	0,713	2,0	409,10	4889	17044	491	2,5	5095	18513
402	0,20	255,3	137,1	4114	0,577	2,0	486,50	4111	9749	530	2,5	4714	12819
403	0,20	255,5	135,3	4090	0,596	2,0	415,30	4816	13823	557	2,5	4488	12007
404	0,20	255,7	138,8	4069	0,560	2,0	426,60	4688	12307	540	2,5	4632	12016
405	0,21	255,8	135,3	3978	0,555	2,0	445,70	4487	11167	553	2,5	4524	11348
406	0,21	255,6	136,3	4050	0,561	2,0	488,90	4091	9387	561	2,5	4454	11126
407	0,20	255,7	135,9	4107	0,601	2,0	459,00	4357	11405	539	2,5	4641	12939
408	0,21	255,7	136,1	4005	0,549	2,0	431,30	4637	11812	556	2,5	4494	11093
409	0,20	255,7	135,6	3933	0,562	2,0	428,70	4665	12222	616	2,5	4058	9249
410	0,20	255,7	135,5	3958	0,561	2,0	417,70	4788	12870	557	2,5	4486	11295
411	0,20	255,1	134,4	3936	0,586	2,0	470,40	4252	10602	544	2,5	4598	12401
412	0,20	255,2	135	3901	0,556	2,0	486,80	4108	9380	540	2,5	4632	11926
413	0,21	255,8	133,9	4611	0,630	2,0	381,70	5240	17291	467	2,5	5353	18049
414	0,21	255,7	133,2	4605	0,650	2,0	405,00	4938	15852	475	2,5	5263	18006
415	0,20	255,9	134,4	4394	0,627	2,0	412,10	4853	14769	495	2,5	5051	15994
416	0,21	255,7	134,5	4793	0,653	2,0	392,20	5099	16975	480	2,5	5205	17683
417	0,20	255,7	134,8	4290	0,610	2,0	401,90	4976	15109	450	2,5	5551	18803
418	0,20	255,9	134,5	4493	0,648	2,0	407,70	4906	15590	497	2,5	5034	16414
419	0,20	255,9	134	4409	0,636	2,0	378,50	5284	17750	473	2,5	5289	17785
420	0,20	255,7	134,2	4285	0,614	2,0	425,00	4706	13589	491	2,5	5095	15930
421	0,20	255,9	133,9	4260	0,618	2,0	399,80	5003	15460	481	2,5	5201	16711
422	0,20	255,8	133,2	4208	0,615	2,0	395,90	5052	15700	472	2,5	5293	17234
423	0,21	255,7	133,4	4412	0,622	2,0	416,90	4797	14311	465	2,5	5372	17949
424	0,18	255,7	133,7	4447	0,719	2,0	380,10	5262	19897	490	2,5	5102	18707
425	0,20	255,7	134	4484	0,646	2,0	378,30	5287	18063	446	2,5	5610	20336
426	0,20	255,7	133,7	4515	0,660	2,0	378,80	5280	18408	423	2,5	5910	23066
427	0,21	255,8	134,5	4302	0,605	2,0	370,30	5401	17642	440	2,5	5682	19524
428	0,20	255,9	134,3	4399	0,628	2,0	354,70	5639	19973	429	2,5	5828	21334
429	0,20	255,7	134	4330	0,633	2,0	379,50	5270	17593	454	2,5	5503	19180
430	0,20	255,9	134,6	4318	0,632	2,0	351,80	5685	20437	437	2,5	5716	20664
431	0,20	256	133,2	4387	0,643	2,0	360,20	5552	19832	436	2,5	5738	21182
432	0,20	255,6	133,9	4435	0,639	2,0	348,90	5732	21001	440	2,5	5678	20602

lâmina	esp.média (cm)	altura (cm)	largura (cm)	massa (g)	Densid. (g/cm³)	Dist.perc. onda (m)	Tempo (µs)	veloc. (m/s)	C _{LL} (MPa)	Tempo médio (µs)	Dist.perc. onda (m)	veloc. (m/s)	Ed (MPa)
433	0,20	255,7	133	4424	0,641	2,0	359,90	5557	19789	447	2,5	5589	20015
434	0,20	255,8	131,7	4358	0,660	2,0	363,10	5508	20024	443	2,5	5639	20988
435	0,20	255,6	133,7	4424	0,632	2,0	372,60	5368	18217	438	2,5	5708	20598
436	0,21	255,7	134,2	4355	0,619	2,0	373,80	5350	17723	437	2,5	5725	20292
437	0,20	255,7	133,5	4278	0,620	2,0	384,70	5199	16768	437	2,5	5716	20274
438	0,20	255,7	133,8	4420	0,651	2,0	367,70	5439	19255	450	2,5	5556	20088
439	0,20	255,8	133,2	4934	0,721	2,0	414,50	4825	16794	473	2,5	5285	20151
440	0,20	255,6	133,6	4880	0,707	2,0	415,80	4810	16348	470	2,5	5315	19963
441	0,21	255,9	134,1	4965	0,697	2,0	387,50	5161	18575	475	2,5	5263	19315
442	0,20	255,9	134,1	4920	0,731	2,0	388,20	5152	19391	492	2,5	5081	18863
443	0,20	255,9	133,9	5012	0,728	2,0	414,80	4822	16918	494	2,5	5061	18638
444	0,20	255,9	133,5	5013	0,718	2,0	383,20	5219	19570	490	2,5	5106	18727
445	0,20	255,7	133	5035	0,727	2,0	415,10	4818	16868	468	2,5	5338	20706
446	0,20	255,8	133,5	5024	0,727	2,0	414,90	4820	16882	471	2,5	5308	20468
447	0,21	256	132,5	5017	0,716	2,0	422,90	4729	16020	491	2,5	5095	18594
448	0,20	255,7	133,4	5049	0,740	2,0	434,70	4601	15666	472	2,5	5293	20733
449	0,20	256,1	134,9	4578	0,669	2,0	381,80	5238	18364	456	2,5	5486	20145
450	0,20	255,7	133,5	4458	0,651	2,0	371,40	5385	18888	458	2,5	5462	19435
451	0,20	255,3	134,8	4547	0,649	2,0	374,00	5348	18567	459	2,5	5447	19261
452	0,21	255,9	135,4	4596	0,643	2,0	361,70	5529	19663	457	2,5	5474	19274
453	0,21	255,7	133,9	4480	0,634	2,0	373,50	5355	18169	446	2,5	5601	19880
454	0,21	255,9	133,3	4604	0,658	2,0	413,30	4839	15417	473	2,5	5282	18367
455	0,21	255,9	135,9	4658	0,647	2,0	363,20	5507	19620	507	2,5	4931	15733
456	0,20	255,9	132,2	4578	0,686	2,0	442,80	4517	13996	467	2,5	5350	19633
457	0,21	255,7	134,2	4510	0,631	2,0	382,70	5226	17237	510	2,5	4899	15145
458	0,21	255,9	134,4	5090	0,710	2,0	375,90	5321	20094	490	2,5	5099	18452
459	0,20	255,7	136	4631	0,663	2,0	395,00	5063	17007	463	2,5	5403	19368
460	0,21	256,1	133,9	4920	0,678	2,0	377,80	5294	19011	496	2,5	5037	17211
461	0,21	255,8	134	4938	0,698	2,0	449,90	4445	13803	472	2,5	5300	19623
462	0,20	255,7	136,4	5050	0,713	2,0	419,90	4763	16181	471	2,5	5304	20067
463	0,20	255,8	132,1	4862	0,714	2,0	402,80	4965	17604	489	2,5	5109	18638
464	0,22	255,7	132,5	4915	0,647	2,0	411,20	4864	15304	482	2,5	5190	17427
465	0,20	255,7	133	4954	0,718	2,0	421,70	4743	16141	499	2,5	5007	17988
466	0,21	256	131,9	4648	0,643	2,0	380,70	5253	17753	434	2,5	5756	21311
467	0,21	255,7	132,9	4762	0,670	2,0	344,90	5799	22546	467	2,5	5350	19187
468	0,20	255,6	133,2	4745	0,682	2,0	373,70	5352	19544	437	2,5	5716	22298
469	0,21	256,1	131,4	4998	0,706	2,0	352,80	5669	22675	465	2,5	5380	20424
470	0,21	255,5	131,2	4578	0,658	2,0	386,00	5181	17669	438	2,5	5703	21409
471	0,20	255,6	133	4780	0,689	2,0	355,00	5634	21877	449	2,5	5568	21368
472	0,21	255,6	131,9	4842	0,696	2,0	385,20	5192	18749	444	2,5	5626	22017
473	0,20	255,7	130,1	4691	0,692	2,0	389,80	5131	18219	434	2,5	5756	22929
474	0,21	255,8	132,8	4703	0,665	2,0	394,60	5068	17078	452	2,5	5531	20337
475	0,20	255,6	131,9	4886	0,717	2,0	394,80	5066	18412	474	2,5	5278	19986
476	0,20	255,5	132,2	4747	0,692	2,0	403,60	4955	17000	428	2,5	5837	23584
477	0,20	255,6	132	4777	0,692	2,0	377,80	5294	19379	448	2,5	5576	21502
478	0,20	255,5	131,2	4660	0,694	2,0	371,90	5378	20077	443	2,5	5648	22142
479	0,20	255,6	132,6	4774	0,692	2,0	405,40	4933	16846	434	2,5	5760	22968
480	0,21	255,4	135,5	3568	0,483	2,0	428,90	4663	10501	521	2,5	4798	11119
481	0,21	255,5	135,2	3415	0,471	2,0	444,60	4498	9526	526	2,5	4750	10621
482	0,21	255,9	135,5	3403	0,462	2,0	453,00	4415	9002	526	2,5	4750	10420
483	0,21	255,9	132,5	4460	0,640	2,0	382,90	5223	17463	473	2,5	5282	17856
484	0,20	256,1	135,1	4663	0,658	2,0	352,40	5675	21201	447	2,5	5597	20620
485	0,20	255,7	134	4735	0,702	2,0	377,70	5295	19694	442	2,5	5652	22436
486	0,20	255,9	134,4	4727	0,685	2,0	369,10	5419	20127	436	2,5	5734	22538
487	0,20	255,2	134,1	4678	0,670	2,0	420,90	4752	15129	433	2,5	5774	22337
488	0,19	256	134,7	4658	0,694	2,0	377,00	5305	19521	440	2,5	5686	22426
489	0,21	255	134,2	4670	0,666	2,0	360,80	5543	20455	449	2,5	5564	20607
490	0,20	255,7	134,9	4756	0,683	2,0	364,30	5490	20573	448	2,5	5580	21256
491	0,20	255,8	133,2	4645	0,672	2,0	367,20	5447	19922	472	2,5	5293	18813
492	0,20	255,9	134	4544	0,649	2,0	393,60	5081	16751	448	2,5	5585	20234
493	0,20	255,7	131,1	4614	0,680	2,0	400,50	4994	16950	436	2,5	5730	22313
494	0,20	255,7	134,2	4523	0,676	2,0	351,10	5696	21933	494	2,5	5057	17288
495	0,20	255,6	131,9	4651	0,703	2,0	428,40	4669	15321	450	2,5	5551	21664
496	0,22	255,6	135,7	4895	0,648	2,0	480,90	4159	11210	487	2,5	5130	17056
497	0,21	255,6	130,9	4584	0,655	2,0	357,70	5591	20469	482	2,5	5187	17614
498	0,20	255,6	134,8	4200	0,605	2,0	407,60	4907	14565	512	2,5	4880	14405
499	0,21	255,7	135,5	4203	0,589	2,0	394,90	5065	15105	508	2,5	4918	14243
500	0,21	255,6	133,5	4170	0,595	2,0	391,10	5114	15570	521	2,5	4798	13709
								média	15026				15379
								mediana	15829				15972
								mínimo	5581				3694
								máximo	23188				24371

ANEXO 5

Resultados obtidos nos corpos-de-prova de painéis

LVL de 13 lâminas

Propriedades físicas										Propriedades mecânicas										Ultra-son	
Tratamento	Painel	Repetição	Dens. (g/cm³)	Dens. Us (g/cm³)	Umidade (%)	Abs. Água (%)	Flexão estática					Resistência de colagem ao esforço de cisalhamento					Veloc. (m/s)	C _{II} (MPa)			
							E _{s,1} (MPa)	f _{M,1} (MPa)	E _{s,1} (MPa)	f _{M,1} (MPa)	f _{M,1} (MPa)	τ _{seco} (MPa)	FM _{seco} (%)	τ _{água fria} (MPa)	FM _{água fria} (%)	τ _{água quente} (MPa)			FM _{água quente} (%)		
1	13	1	0.7200	0.6871	9.705	26.65	14783	95.49	571	4.39	6.02	100	5.13	100	4.21	80	5840	23435			
1	13	2	0.7155	0.7067	9.996	27.86	15521	108.93	597	3.79	5.97	100	3.29	100	2.90	90	5773	23550			
1	13	3	0.7099	0.6944	10.644	30.49	15492	113.47	545	4.01	5.74	100	3.69	100	3.98	70	5677	23379			
1	13	4	0.6937	0.6936	10.431	31.40	15168	111.08	731	4.14	4.53	100	3.59	90	3.96	90	5835	23613			
1	13	5	0.7228	0.7223	10.126	34.27	14713	115.21	680	3.76	3.83	100	3.05	100	3.23	90	5793	24240			
1	13	6	0.7228	0.7223	10.126	34.27	14713	115.21	680	3.76	3.83	100	3.05	100	3.23	90	5793	24240			
1	14	1	0.7305	0.6942	10.018	24.93	13262	98.78	666	4.41	6.36	100	4.74	90	3.69	90	5613	21873			
1	14	2	0.6724	0.6855	10.404	28.49	13843	105.27	695	5.16	5.65	100	4.40	80	4.10	80	5508	20801			
1	14	3	0.6995	0.6819	10.169	25.01	13155	120.12	650	5.03	5.82	100	4.97	80	3.42	80	5485	20517			
1	14	4	0.7287	0.7347	10.294	25.10	16041	129.39	679	4.79	5.96	100	4.35	100	4.23	70	5541	22559			
1	14	5	0.7268	0.6966	10.296	29.96	14560	117.75	775	4.30	4.77	100	4.91	100	4.96	70	5570	21610			
1	14	6	0.7207	0.7207	10.082	30.77	15100	103.81	706	4.50	4.81	100	5.32	100	3.94	50	5712	23512			
1	15	1	0.7609	0.7354	9.793	25.84	14039	110.69	719	5.54	7.10	100	4.67	70	3.41	80	5546	22621			
1	15	2	0.7168	0.7466	10.024	26.86	14139	119.83	732	5.62	6.20	100	4.46	90	3.85	80	5337	21263			
1	15	3	0.7324	0.7360	10.064	37.04	14291	124.74	746	5.19	7.05	100	4.52	90	4.32	40	5490	22183			
1	15	4	0.7391	0.7335	10.229	32.44	15255	131.30	812	5.60	5.13	100	4.54	80	3.36	90	5575	22796			
1	15	5	0.7495	0.7354	10.082	27.49	14416	111.59	794	5.51	5.55	90	4.71	100	3.45	90	5885	21327			
1	15	6	0.7285	0.7285	10.712	32.29	14052	86.81	891	5.64	6.10	100	5.10	90	3.48	70	5551	22447			
2	16	1	0.6605	0.6573	10.729	38.95	10956	72.11	767	6.28	4.53	100	4.22	80	3.56	100	5259	18177			
2	16	2	0.6874	0.6985	10.443	36.87	11371	86.75	662	5.56	6.71	100	3.36	100	2.97	100	5381	19066			
2	16	3	0.7211	0.6772	10.681	27.15	11562	89.92	672	4.78	4.80	100	3.53	90	3.20	90	5417	19869			
2	16	4	0.7323	0.6965	10.712	33.36	12377	82.91	554	6.01	4.88	100	3.36	80	3.10	70	5545	19900			
2	16	5	0.6589	0.6515	10.767	30.90	12133	94.75	615	4.42	4.18	100	3.31	90	2.78	80	5217	17729			
2	16	6	0.6508	0.6508	10.767	35.34	12465	81.87	586	4.85	5.05	100	4.03	90	3.28	60	5462	19418			
2	17	1	0.7130	0.7074	10.787	32.48	12739	93.51	586	4.76	5.67	100	3.53	80	2.64	40	5499	21393			
2	17	2	0.7233	0.7056	10.899	40.42	13240	94.99	663	4.54	4.82	100	2.63	80	3.20	50	5462	21052			
2	17	3	0.7231	0.7192	10.864	30.17	13257	105.18	623	4.49	4.50	100	4.37	90	2.39	50	5337	20484			
2	17	4	0.6903	0.7118	10.775	36.35	12463	105.56	641	5.06	4.95	100	4.43	50	3.44	70	5315	20107			
2	17	5	0.7045	0.6966	10.999	44.12	12276	101.53	679	4.29	5.75	100	3.81	90	3.24	40	5354	19970			
2	17	6	0.7156	0.7156	10.852	34.93	13088	82.06	628	4.96	5.92	100	3.45	80	3.96	90	5453	21278			
2	18	1	0.6960	0.6519	10.852	42.61	11291	104.55	675	4.77	8.09	100	3.01	90	3.96	80	5448	19353			
2	18	2	0.6490	0.5944	11.008	42.09	10240	75.28	693	4.24	5.09	90	4.61	90	3.00	80	5167	15868			
2	18	3	0.6049	0.6505	10.960	39.54	11892	108.71	701	4.40	5.23	100	3.54	90	3.57	80	5439	19246			
2	18	4	0.6457	0.6318	11.417	38.77	10492	86.14	724	4.26	4.21	100	1.96	100	2.34	90	5221	17221			
2	18	5	0.6647	0.6613	11.325	46.11	11942	97.34	686	4.08	4.53	100	2.11	90	2.54	90	5394	19241			
2	18	6	0.6673	0.6673	10.072	40.53	12673	92.03	722	3.49	4.71	100	3.46	90	3.38	90	5385	19352			
3	19	1	0.7160	0.7010	10.220	31.47	14557	114.33	604	4.79	5.20	100	3.81	90	3.03	80	5560	21674			
3	19	2	0.7191	0.7100	9.764	32.95	14581	113.35	697	4.84	4.96	100	3.66	70	3.36	60	5499	21471			
3	19	3	0.7050	0.7042	9.668	34.76	14503	113.61	670	4.88	5.18	100	4.06	80	2.94	70	5448	20905			
3	19	4	0.7544	0.7261	9.909	26.35	15264	119.45	702	5.42	5.70	100	3.70	100	2.70	70	5633	23038			
3	19	5	0.6786	0.7071	10.072	29.92	15058	119.78	761	5.99	6.54	100	4.18	90	3.18	80	5575	21975			
3	19	6	0.7103	0.7103	9.649	32.23	15909	134.30	692	5.25	6.48	100	4.10	90	2.75	40	5408	20771			
3	20	1	0.6995	0.6730	9.649	31.97	15133	118.42	912	5.38	4.04	100	2.80	100	2.98	90	5783	22508			
3	20	2	0.6599	0.6804	9.831	25.42	15648	111.43	822	5.56	6.62	100	4.18	90	3.84	90	5570	21109			

Propriedades físicas										Propriedades mecânicas									
Dens. Us					Flexão estática					Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento					Ultra-som				
Tratamento	Panela	Repetição	Dens. (g/cm³)	Umidade (%)	Abs. Água (%)	E _{s,1} (MPa)	f _{M,1} (MPa)	E _{s,1} (MPa)	f _{M,1} (MPa)	t _{seco} (MPa)	FM seco (%)	t _{água fria} (MPa)	FM água fria (%)	t _{água quente} (MPa)	FM água quente (%)	Veloc. (m/s)	C _{II} (MPa)		
3	20	3	0,6871	9,169	29,22	15646	120,82	825	4,88	5,61	100	4,70	90	4,19	20	5842	22679		
3	20	4	0,7457	9,663	35,80	16367	117,49	908	4,61	5,31	100	3,47	90	3,95	90	5570	22169		
3	20	5	0,6975	10,181	35,84	15237	116,47	883	4,32	5,92	100	3,59	100	3,15	60	5684	21749		
3	20	6	0,6710	10,670	28,53	15518	118,88	807	4,39	3,22	100	3,29	100	2,99	90	5757	22242		
3	21	1	0,6811	10,460	40,31	15380	121,06	846	6,27	5,64	100	3,69	100	3,95	90	5399	20861		
3	21	2	0,6930	10,600	39,71	13876	97,31	801	5,16	4,78	100	3,26	100	2,85	90	5408	20639		
3	21	3	0,6929	10,840	41,19	15644	124,69	724	5,06	3,21	100	2,61	100	2,98	50	5444	21118		
3	21	4	0,6809	11,073	36,94	14387	114,31	727	4,48	4,18	100	2,51	100	2,64	90	5575	22163		
3	21	5	0,7278	10,958	43,27	14116	102,63	870	5,14	4,77	100	3,05	90	2,44	90	5175	18634		
3	21	6	0,7010	10,689	37,84	15687	91,07	839	5,32	3,83	100	3,32	90	3,10	70	5324	19867		
4	22	1	0,7520	10,689	27,99	14927	124,24	717	4,74	5,98	100	3,73	100	3,61	80	5448	22883		
4	22	2	0,7796	10,650	23,27	14257	105,04	802	4,53	6,99	100	4,19	60	3,90	40	5435	22594		
4	22	3	0,7667	10,628	28,15	15609	125,08	785	5,10	6,12	100	3,59	90	4,10	80	5518	23985		
4	22	4	0,7729	10,734	30,13	14836	120,50	792	4,66	6,47	100	3,45	70	3,64	40	5689	24756		
4	22	5	0,7439	11,076	25,31	15282	136,97	805	4,77	6,43	100	3,97	90	4,27	70	5608	24150		
4	22	6	0,7664	10,2717	25,20	16289	125,33	853	4,54	6,45	100	5,14	70	3,79	70	5747	25313		
4	23	1	0,7531	10,2717	28,13	13418	116,92	764	4,99	6,10	100	3,85	100	3,31	100	5225	20867		
4	23	2	0,7513	10,2334	22,66	13272	88,92	836	5,87	7,65	100	4,30	70	4,24	30	5476	22801		
4	23	3	0,7724	10,2442	29,27	15495	128,54	824	6,14	4,65	100	4,94	90	2,81	40	5448	22824		
4	23	4	0,7719	10,4351	26,22	15228	132,68	799	5,01	6,41	100	4,81	90	3,96	80	5594	24210		
4	23	5	0,7676	10,4830	33,45	14790	95,48	805	5,07	6,31	100	4,02	90	3,26	80	5523	22850		
4	23	6	0,7413	10,6255	31,13	12594	95,84	879	5,33	6,17	100	4,82	90	4,08	50	5302	20837		
4	24	1	0,7123	10,6255	26,28	12485	112,62	743	4,79	7,47	100	5,14	90	4,94	40	5435	21064		
4	24	2	0,7218	10,8437	29,74	13323	114,30	719	4,94	7,34	100	5,07	90	4,05	50	5385	21481		
4	24	3	0,7261	10,8111	28,82	11462	106,06	638	4,44	8,30	100	4,47	60	4,76	80	5138	19203		
4	24	4	0,7566	11,0162	24,95	12107	103,55	725	4,47	7,38	100	4,67	100	3,70	70	5134	19224		
4	24	5	0,7441	11,3895	26,35	12564	114,71	814	4,80	8,49	100	3,54	70	4,59	50	5126	19740		
4	24	6	0,7455	11,076	33,90	13501	122,29	813	4,72	5,79	100	4,19	40	4,05	20	5390	21655		

ANEXO 6

**Resultados obtidos nos corpos-de-prova de painéis
LVL de 25 lâminas**

Tratamento	Painel	Repetição	Propriedades físicas				Propriedades mecânicas										Ensaio não-destrutivo					
			Densidade aparente c.p.latiwse (g/cm³)	Umidade (%)	E _{at} (MPa)	f _{v,at} (MPa)	E _{arço} (MPa)	f _{v,arço} (MPa)	f _o (MPa)	f _o (MPa)	Corpos-de-prova latwise			ondas de tensão			Corpos-de-prova edgewise					
											ultra-som Veloc. (m/s)	C ₁ (MPa)	Veloc. (m/s)	E _p (MPa)	ultra-som Veloc. (m/s)	C ₁ (MPa)	ondas de tensão Veloc. (m/s)	E _a (MPa)				
1	1	1	0,7417	8,625	14361	97,70	16475	102,88	65,34	11,90	5548	22829	4914	17910	5486	22732	5209	20498				
1	1	2	0,7446	7,908	13414	98,63	21022	106,43	68,78	10,34	5558	22899	5086	19260	5544	23388	5261	21055				
1	1	3	0,7815	7,927	16186	112,33	21352	79,85	68,47	10,76	5669	25114	5079	20158	5561	23742	5238	21071				
1	1	4	0,7584	8,083	15295	117,10	20482	104,49	71,38	7,75	5663	24463	5086	19695	5514	23193	5317	21565				
1	1	5	0,7457	8,088	14327	104,00	16274	107,92	65,91	11,97	5633	23664	5079	19237	5542	23393	5261	21078				
1	1	6	0,7488	8,485	14050	102,80	18706	112,00	68,50	11,46	5653	23931	5065	19209	5521	23235	5235	21054				
1	1	7								10,51												
1	1	8								11,14												
1	1	9								8,29												
1	1	10								10,11												
1	2	1	0,7341	8,712	14830	114,97	15902	97,61	65,50	11,89	5581	22863	5041	18653	5519	22310	5390	21280				
1	2	2	0,7301	8,159	13661	109,02	14812	96,66	64,63	10,86	5518	22229	5125	19175	5570	22564	5433	21481				
1	2	3	0,7335	7,955	14324	126,44	14529	94,74	62,25	10,80	5600	23001	5228	20047	5569	22792	5287	20538				
1	2	4	0,7306	8,125	14734	117,55	16829	93,42	62,55	9,80	5657	23380	5225	19944	5526	22272	5213	19819				
1	2	5	0,7296	8,120	14409	109,66	19033	104,41	63,19	9,20	5639	23199	5152	19368	5588	23062	5433	21798				
1	2	6	0,7221	8,984	14068	123,17	15415	102,39	65,29	8,26	5658	23122	5177	19356	5555	22674	5274	20434				
1	2	7								10,30												
1	2	8								9,65												
1	2	9								9,40												
1	2	10								10,16												
1	3	1	0,7328	8,685	14677	122,83	18316	107,63	66,17	10,83	5636	24958	5235	20084	5736	24444	5505	22513				
1	3	2	0,7416	8,535	14623	122,47	19092	99,59	66,34	9,86	5827	25182	5345	21187	5716	23786	5469	21769				
1	3	3	0,7440	8,182	15196	122,77	20598	99,55	68,08	9,09	5881	25733	5116	19477	5732	23609	5403	20983				
1	3	4	0,7417	8,163	14466	109,64	18252	99,83	69,87	9,01	5902	25635	5337	21127	5756	24066	5401	21192				
1	3	5	0,7286	8,630	14716	116,32	17647	107,20	59,88	10,40	5908	25356	5239	19945	5703	23902	5521	22400				
1	3	6	0,7239	8,561	14661	133,91	21854	102,89	69,83	8,15	5875	24990	5313	20434	5711	23930	5390	21312				
1	3	7								7,93												
1	3	8								8,76												
1	3	9								8,00												
1	3	10								9,12												
2	4	1	0,6822	8,154	12045	77,34	13225	80,08	48,94	11,76	5004	17083	4548	14109	4832	16000	4535	14090				
2	4	2	0,6789	8,491	11739	73,17	12688	81,47	51,43	11,76	4830	15837	4436	13360	4755	15325	4529	13905				
2	4	3	0,6817	8,223	11944	87,11	12279	75,10	49,29	11,14	4921	16510	4464	13586	4952	16043	4526	13982				
2	4	4	0,6629	7,923	11856	91,29	14247	68,69	52,47	10,80	5030	16773	4390	12777	4895	16330	4610	14486				
2	4	5	0,6749	8,739	11703	92,48	10694	66,15	52,99	9,32	4988	16659	4443	13321	4760	15229	4547	13898				
2	4	6	0,6664	9,026	12599	92,74	11461	85,17	51,08	11,70	4976	16500	4607	14145	4755	15560	4523	14078				
2	4	7								9,57												
2	4	8								11,61												
2	4	9								10,34												
2	4	10								10,08												
2	5	1	0,6406	8,891	10763	84,14	14201	79,60	49,43	10,22	5177	17171	4689	14084	5042	16392	4782	14742				
2	5	2	0,6360	8,818	10906	90,32	11713	68,15	46,95	9,96	5102	16556	4847	14944	5025	15666	4835	14500				
2	5	3	0,6162	8,449	10092	66,38	10772	73,13	46,49	8,92	5183	16552	4761	13969	5061	15797	4850	14509				
2	5	4	0,6150	8,332	10484	73,59	11688	50,68	49,39	9,96	5051	15689	4650	13297	5049	16061	5121	16522				
2	5	5	0,6268	8,500	11273	85,21	11960	76,07	48,85	9,09	5292	17613	4739	14121	5064	16031	5256	17268				
2	5	6	0,6209	9,331	10375	81,91	11873	69,19	45,28	10,56	5129	16337	4632	13321	5010	15685	4846	14674				

Tratamento	Painel	Repetição	Propriedades físicas				Propriedades mecânicas							Ensaio não-destrutivo				
			Densidade aparente c.p./lathwise g/cm³)	Umidade (%)	E _{at} (MPa)	f _{v,at} (MPa)	E _{u,edge} (MPa)	f _{v,edge} (MPa)	f _{u,o} (MPa)	f _{u,o} (MPa)	Corpos-de-prova lathwise		Corpos-de-prova edgewise					
											C _u (MPa)	Veloc. (m/s)	C _e (MPa)	Veloc. (m/s)	E _u (MPa)	Veloc. (m/s)	C _e (MPa)	Veloc. (m/s)
2	5	7									9,84							
2	5	8									9,26							
2	5	9									10,52							
2	5	10									9,52							
2	6	1	0,6550	8,724	9529	76,49	10150	58,21	47,38	9,92	4533	13459	4189	11495	4509	13556	4258	12091
2	6	2	0,6629	8,369	10093	71,89	10346	69,38	50,01	11,16	4566	13818	4237	11900	4491	13284	4263	11980
2	6	3	0,6522	8,078	9643	76,15	9916	56,04	44,83	10,47	4512	13279	4147	11216	4561	13602	4454	12966
2	6	4	0,6527	8,016	9365	74,80	10138	58,03	43,77	10,34	4593	13768	4232	11689	4417	12786	4205	11587
2	6	5	0,6501	8,187	9940	74,76	10565	52,82	45,85	10,19	4667	14161	4284	11930	4527	13502	4230	11786
2	6	6	0,6493	8,153	9462	76,20	10075	57,36	42,93	7,90	4611	13808	4166	11268	4499	13339	4361	12530
2	6	7								12,24								
2	6	8								8,05								
2	6	9								9,48								
2	6	10								8,67								
3	7	1	0,6290	8,525	13272	92,73	12207	76,93	44,17	7,98	5022	15641	4679	13751	4983	15588	4835	14675
3	7	2	0,6181	8,205	13119	89,47	10158	72,84	43,00	9,56	5075	15918	4637	13289	4825	14275	4470	12254
3	7	3	0,6087	8,668	12796	102,31	11924	71,68	43,94	8,93	4953	14929	4683	13350	4842	14563	4605	13173
3	7	4	0,6152	8,306	13106	103,45	10027	74,03	45,99	7,18	4988	15306	4662	13369	4788	14320	4603	13237
3	7	5	0,6075	8,6300	12667	104,51	11514	70,35	48,43	7,59	5035	15399	4745	13678	4922	15264	4777	14375
3	7	6	0,6227	8,708	13944	103,76	11158	63,38	45,90	8,50	5050	15884	4688	13569	4884	14909	4690	13744
3	7	7								9,35								
3	7	8								9,75								
3	7	9								8,99								
3	7	10								9,94								
3	8	1	0,6476	8,418	13954	88,20	12266	74,87	49,42	9,79	5147	17158	4739	14543	5047	16745	4819	15270
3	8	2	0,6594	8,858	14327	94,94	12810	65,81	48,37	10,61	5166	17597	4690	14505	4979	15811	4801	14700
3	8	3	0,6451	8,453	14507	87,99	11306	80,09	50,32	7,75	5198	17431	4690	14190	4947	15860	4788	14858
3	8	4	0,6378	8,458	14244	97,26	12757	79,87	52,27	8,52	5139	16844	4810	13554	4995	16478	4761	14870
3	8	5	0,6644	8,6590	13760	86,99	11214	74,34	48,82	8,79	5182	17940	4733	14883	5013	16561	4666	14346
3	8	6	0,6603	8,190	14394	94,15	11384	71,70	53,03	9,60	5125	17945	4842	15480	4953	15926	4686	14256
3	8	7								7,30								
3	8	8								7,96								
3	8	9								8,84								
3	8	10								7,72								
3	9	1	0,6792	8,233	14039	90,47	15306	88,65	51,03	9,62	5361	19520	5047	17304	5273	19007	5078	17631
3	9	2	0,6593	8,509	13165	86,33	15349	88,90	57,93	7,66	5335	18765	4933	16046	5257	19223	5027	17578
3	9	3	0,6978	8,783	13201	88,50	16311	85,83	56,51	12,16	5042	17743	4735	15645	5299	18491	5392	19665
3	9	4	0,7090	8,450	13403	89,31	17044	93,58	53,35	11,62	5157	18856	4858	16725	5206	18599	4979	17016
3	9	5	0,6943	8,802	12945	90,16	14695	89,61	58,37	8,64	5166	18456	4868	15125	5302	19143	5187	18324
3	9	6	0,6866	8,387	13128	82,92	14101	87,88	61,99	10,23	5297	19261	4805	15854	5274	18521	5092	17266
3	9	7								10,34								
3	9	8								9,29								
3	9	9								8,99								
3	9	10								8,99								
4	10	1	0,7063	9,135	14908	102,77	16110	97,78	58,48	8,40	5484	21245	5138	18647	5490	21046	5262	18833
4	10	2	0,6875	9,464	13644	111,46	15603	90,73	55,87	9,95	5449	20413	4954	16871	5366	20030	5097	18072

ANEXO 7

Valores do $E_{s,f}$ e E_T dos corpos-de-prova dos 24 painéis estudados

Tratam.	Painel	Painel 25 lâminas			c.p.	E flexão	
		E teorico	Centro geom	Centro geom			
1	1	18063	2,47024		1	14361	
		18063	2,47024		2	13414	
		18063	2,47024		3	16186	
		18063	2,47024		4	15295	
		18063	2,47024		5	14327	
		18063	2,47024		6	14050	
	2	2	16937	2,49966		7	14830
			16937	2,49966		8	13661
			16937	2,49966		9	14324
			16937	2,49966		10	14734
			16937	2,49966		11	14409
			16937	2,49966		12	14068
3	3	17009	2,45982		13	14677	
		17009	2,45982		14	14623	
		17009	2,45982		15	15196	
		17009	2,45982		16	14466	
		17009	2,45982		17	14716	
		17009	2,45982		18	14661	
4	4	13403	2,45494		19	12045	
		13403	2,45494		20	11739	
		13403	2,45494		21	11844	
		13403	2,45494		22	11856	
		13403	2,45494		23	11703	
		13403	2,45494		24	12599	
5	5	11859	2,42726		25	10763	
		11859	2,42726		26	10606	
		11859	2,42726		27	10092	
		11859	2,42726		28	10484	
		11859	2,42726		29	11273	
		11859	2,42726		30	10375	
6	6	10359	2,49846		31	9529	
		10359	2,49846		32	10093	
		10359	2,49846		33	9643	
		10359	2,49846		34	9365	
		10359	2,49846		35	9940	
		10359	2,49846		36	9462	

Tratam.	Painel	Painel 25 lâminas			c.p.	E flexão	
		E teorico	Centro geom	Centro geom			
3	7	16084	2,48650		37	13272	
		16084	2,48650		38	13119	
		16084	2,48650		39	12796	
		16084	2,48650		40	13106	
		16084	2,48650		41	12667	
		16084	2,48650		42	13344	
	8	8	16644	2,45590		43	13954
			16644	2,45590		44	14327
			16644	2,45590		45	14507
			16644	2,45590		46	14244
			16644	2,45590		47	13760
			16644	2,45590		48	14334
4	9	16365	2,50137		49	14039	
		16365	2,50137		50	13165	
		16365	2,50137		51	13201	
		16365	2,50137		52	13403	
		16365	2,50137		53	12845	
		16365	2,50137		54	13128	
	10	10	15613	2,50840		55	14308
			15613	2,50840		56	13644
			15613	2,50840		57	13716
			15613	2,50840		58	13871
			15613	2,50840		59	14229
			15613	2,50840		60	14655
11	11	16822	2,52585		61	14564	
		16822	2,52585		62	13829	
		16822	2,52585		63	13326	
		16822	2,52585		64	13950	
		16822	2,52585		65	14221	
		16822	2,52585		66	15166	
12	12	14470	2,44316		67	13891	
		14470	2,44316		68	13909	
		14470	2,44316		69	13604	
		14470	2,44316		70	14031	
		14470	2,44316		71	14198	
		14470	2,44316		72	13642	

Tratam.	Painel 13 lâminas				
	Painel	E teorico	Centro geom	c.p.	E flexão
1	13	18529	1,31257	1	14783
		18529	1,31257	2	15521
		18529	1,31257	3	15492
		18529	1,31257	4	15168
		18529	1,31257	5	14713
		18529	1,31257	6	16075
	14	17609	1,29284	7	13262
		17609	1,29284	8	13843
		17609	1,29284	9	13155
		17609	1,29284	10	16041
		17609	1,29284	11	14560
		17609	1,29284	12	15100
15	18202	1,30059	13	14039	
	18202	1,30059	14	14139	
	18202	1,30059	15	14291	
	18202	1,30059	16	15255	
	18202	1,30059	17	14416	
	18202	1,30059	18	14052	
16	13458	1,32245	19	10956	
	13458	1,32245	20	11371	
	13458	1,32245	21	11562	
	13458	1,32245	22	12377	
	13458	1,32245	23	12133	
	13458	1,32245	24	12465	
17	12621	1,26850	25	12739	
	12621	1,26850	26	13240	
	12621	1,26850	27	13257	
	12621	1,26850	28	12463	
	12621	1,26850	29	12276	
	12621	1,26850	30	13088	
18	12977	1,31627	31	11291	
	12977	1,31627	32	10240	
	12977	1,31627	33	11892	
	12977	1,31627	34	10492	
	12977	1,31627	35	11942	
	12977	1,31627	36	12673	

Tratam.	Painel 13 lâminas				
	Painel	E teorico	Centro geom	c.p.	E flexão
3	19	17673	1,28680	37	14557
		17673	1,28680	38	14581
		17673	1,28680	39	14503
		17673	1,28680	40	15264
		17673	1,28680	41	15058
		17673	1,28680	42	15909
	20	17625	1,34388	43	15133
		17625	1,34388	44	15648
		17625	1,34388	45	15646
		17625	1,34388	46	16357
		17625	1,34388	47	15237
		17625	1,34388	48	15518
21	16971	1,28994	49	15380	
	16971	1,28994	50	13876	
	16971	1,28994	51	15644	
	16971	1,28994	52	14387	
	16971	1,28994	53	14116	
	16971	1,28994	54	15687	
4	22	16165	1,30176	55	14927
		16165	1,30176	56	14257
		16165	1,30176	57	15609
		16165	1,30176	58	14836
		16165	1,30176	59	15292
		16165	1,30176	60	16289
	23	16692	1,31189	61	13418
		16692	1,31189	62	13272
		16692	1,31189	63	15495
		16692	1,31189	64	15228
		16692	1,31189	65	14790
		16692	1,31189	66	12594
24	13532	1,28738	67	12485	
	13532	1,28738	68	13323	
	13532	1,28738	69	11462	
	13532	1,28738	70	12107	
	13532	1,28738	71	12564	
	13532	1,28738	72	13501	