

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS PARA A  
PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL)**

MARCELA REGINA SIQUEIRA AMORIM

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS PARA A  
PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL)**

MARCELA REGINA SIQUEIRA AMORIM

ORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de **Mestre** em Ciências Florestais – Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

BRASÍLIA, JULHO DE 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS PARA A  
PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL)

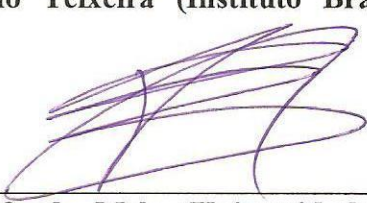
MARCELA REGINA SIQUEIRA AMORIM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Claudio Henrique Siqueira Del Menezzi (Departamento de Engenharia Florestal, UnB);  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Divino Eterno Teixeira (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente - IBAMA);  
(Examinador externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rafael Rodolfo de Melo (Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG);  
(Examinador externo)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal, UnB);  
(Examinador suplente)

Brasília, 19 de julho de 2013

A524a Amorim, Marcela Regina Siqueira.  
Agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a  
produção de painéis de lâminas paralelas (LVL) / Marcela  
Regina Siqueira Amorim. -- 2013.  
103 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília,  
Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal,  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 2013.  
Inclui bibliografia.  
Orientação: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi.

1. Madeira - Produtos. 2. Madeira - Química - Amazônia.  
3. Madeira - Pesquisa - Propriedades mecânicas. I. Del Menezzi,  
Cláudio Henrique Soares. II. Título.

CDU 634.0.81

#### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMORIM, M. R. S. 2013. **Agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a produção de painéis de lâminas paralelas (LVL)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal. Publicação PPG EFL 217/2013, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103p.

#### CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcela Regina Siqueira Amorim

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a produção de painéis de lâminas paralelas (LVL).

GRAU: Mestre

ANO: 2013.

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

Marcela Regina Siqueira Amorim

3ª avenida Bloco 1780 Casa 29, Núcleo Bandeirante/ 71720-023, Brasília – DF

marcela.siqueira.amorim@gmail.com

À Deus

“Desde o início de minha caminhada,  
tu estavas comigo.  
Dias e noites se passaram.  
Vitórias foram conquistadas.  
Derrotas foram superadas.  
Amizades foram criadas.  
Conhecimentos foram adquiridos...  
E agora que alcancei o meu objetivo,  
Venho Te louvar, Te agradecer, Te oferecer  
Humildemente a minha vida, o amor, a felicidade,  
Enfim, a vitória deste momento.  
Obrigado Senhor”

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por guiar meus passos e por me dar coragem e força pra chegar onde estou. E à Maria por sempre passar na frente.

Agradeço aos meus pais, Paulo e Celi, por todo o apoio, palavras de incentivo, abraços e, principalmente, pela paciência que tiveram comigo ao longo dessa jornada. Agradeço imensamente a Deus por ter minha mãe viva, presenciando mais uma vitória minha.

Agradeço a toda minha grande família, que amo incondicionalmente, aos meus primos pelo carinho e a minha prima Ana Clara por ser amiga acima de tudo e ter me dado a benção de batizar a nossa flor, Laura.

Ao meu orientador e amigo, Cláudio Del Menezzi, que mais uma vez me guiou dando exemplo de profissional dedicado, responsável e sempre presente, me ajudando e compreendendo os percalços pessoais sofridos nestes dois últimos anos.

Aos membros dessa banca, Divino Eterno Teixeira e Rafael Rodolfo Melo, pela presença e disponibilidade em acrescentar conhecimento.

À CAPES, pelo apoio financeiro. E ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT Madeiras da Amazônia (INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) por abraçar meu projeto.

Ao Laboratório de Produtos Florestais – Serviço Florestal Brasileiro (LPF – SFB) e seus funcionários, Mário Rabelo, João Anacleto, Zé Arlete, Vera Coradin, Marcos Santana, Anne Okino, Ricardo, Lopes, Gouveia, Greg, Lula e outros, em abrir as portas do laboratório e me ajudar com presteza sempre que necessário.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, Juraci, Paula, Itamar, Pedro e Chiquinho pela disponibilidade em ajudar. E ao Prof. Dr. Ildeu Martins pela ajuda nas análises estatísticas.

À Universidade Brasília (UnB) e ao Departamento de Engenharia Florestal (EFL) por terem me proporcionado um ensino de qualidade e ter contribuído para a minha formação profissional e social.

Agradeço ao Sr. Antônio Marcos, da empresa Madeiranit, pela concessão das lâminas utilizadas nesse trabalho e pela oportunidade de ver na prática como funciona uma indústria

de painéis. E agradeço também, ao Sr. Clênio Tortelli, da Tino Manosso Representações – Franklin Adesivos, pela doação dos adesivos.

Aos meus queridos amigos do LabMad, Patrícia, Fred, Ricardo, Duda, Rafael, Loureine, Sabrina, Rébla e Larissa, que estiveram ao meu lado sofrendo e sendo felizes. Aos meus amigos de pós-graduação Fabrícia, Olívia, Éder, Bárbara e Renielton pela companhia e sorrisos.

À todos os amigos floresteiros, que mesmo traçando os mais diferentes caminhos, permanecem junto de mim mesmo quando longe. E a todos os amigos pessoais, mesmo não entendendo o que eu faço sempre estiveram por perto, apresentando palavras de carinho.





## RESUMO

### AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL)

**Autora:** Marcela Regina Siqueira Amorim

**Orientador:** Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

**Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, Julho de 2013.**

Painéis de lâminas paralelas (LVL) são painéis estruturais com lâminas de madeira coladas paralelamente entre si com adesivos estruturais, utilizando elevadas temperaturas e pressões. Foram avaliadas propriedades das lâminas de cinco espécies amazônicas (*Trattinnickia burseraefolia*, *Copaifera sp.*, *Micropholis sp.*, *Schizolobium amazonicum* e *Parkia pendula*): rugosidade, molhabilidade, densidade, retratibilidade e composição química. Estas variáveis foram utilizadas em uma análise de variáveis canônicas a fim de agrupar as espécies para posterior confecção dos painéis LVL. Foram estabelecidos oito tratamentos sem prévia classificação das lâminas; três tratamentos com mistura de espécies tiveram em suas superfícies espécies mais densas que o miolo e os outros cinco tratamentos foram homogêneos. Foram confeccionados painéis com 9 lâminas, utilizando o adesivo PVA<sub>c</sub> (150 g/m<sup>2</sup>), temperatura de 104°C, tempo de prensagem de 9 e 5 minutos e 1 MPa de pressão específica. Foram realizados os ensaios de: avaliação não-destrutiva (*Stress Wave Timer* e Ultrassom), propriedades mecânicas (flexão estática, compressão paralela e cisalhamento paralelo à linha de cola) e propriedades físicas (densidade, absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura). A avaliação das combinações faz notar que o agrupamento das espécies sugerido no capítulo 1, reflete no agrupamento dos tratamentos do G3 e do G4. Contudo não é completamente eficiente na percepção do G1 e do G2, pois estes grupos apresentaram dissimilaridades e geraram quatro novos grupos. No agrupamento por tratamento, T7 configurou um novo grupo, isolado, com características únicas. A utilização da avaliação não-destrutiva mostrou-se eficiente para prever as propriedades mecânicas dos painéis LVLs confeccionados, desde que considerados todos os tratamentos incluídos no modelo. Por fim, nas propriedades mecânicas o G3 apresentou os melhores resultados, assim como nas propriedades físicas.

**Palavras-chave:** Painéis de lâminas paralelas, agrupamento, espécies amazônicas, avaliação não-destrutiva, propriedades mecânicas, propriedades físicas.

## **ABSTRACT**

### **GROUPING AMAZONIAN WOOD SPECIES FOR LAMINATED VENEER LUMBERS (LVL) PRODUCTION**

**Author: Marcela Regina Siqueira Amorim**

**Advisor: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi**

**Post-Graduate Program on Forest Sciences**

**Brasília, July of 2013.**

Laminated veneer lumber (LVL) is a structural board in which lumber veneers are assembled together with structural adhesives at high temperatures and pressures. It was evaluated the veneers properties of five Amazonian wood species (*Trattinnickia burseraefolia*, *Copaifera sp.*, *Micropholis sp.*, *Schizolobium amazonicum* e *Parkia pendula*): roughness, wettability, density, dimensional shrinkage and chemistry composition. These variables were used in a canon variable analysis to group the species for the LVL production. Eight treatments were established without veneers prior classification; three treatments with mixtures of species had on their edges species denser than the core and the other five treatments were homogeneous. All the LVL were produced with 9 veneers according to the following characteristics: PVA<sub>c</sub> (polyvinyl acetate crosslinkg) 150 g/m<sup>2</sup>, hot-pressing ate 104°C for 9 and 5 minutes at 1 MPa of specific pressure. The LVL properties were evaluated according to the specifics standards: nondestructive evaluation (Stress Wave Timer and Ultrasound), mechanical properties (modulus of rupture, static bending modulus of elasticity, parallel compression strength and parallel shear strength) ans physical properties (LVL density, water absorption, thickness swelling and permanent thickness swelling). The combinations evaluation notes that the species grouping suggested ins chapter 1, reflects on the treatments grouping of G3 and G4. However it is not completely efficient in G1 and G2 perception; due their dissimilarity it was generated four new groups. In treatment grouping, T7 configured a new group, isolated, with unique features. As the use of non destructive evaluation, it was effective to predict the mechanical properties of LVL panels when all treatments where included in the model. Finally, G3 showed the best results for the mechanical properties as well as in physical properties.

**Key-words:** Laminated Veneer Lumber, grouping, amazonian, nondestructive evaluation, mechanical properties, physical properties.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT .....	ii
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>3</b>
<b>3. HIPÓTESE GERAL.....</b>	<b>4</b>
<b>4. REVISÃO GERAL DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
4.1. Painel de lâminas paralelas (LVL) .....	5
4.2. Espécies .....	7
4.2.1. <i>Trattinnickia burseraefolia</i> (Mart.) Willd. ....	7
4.2.2. <i>Copaifera</i> sp. ....	7
4.2.3. <i>Micropholis</i> sp. ....	8
4.2.4. <i>Schizolobium amazonicum</i> (Huber) ex. Ducke.....	8
4.2.5. <i>Parkia pendula</i> (Willd.) Walp. ....	8
4.3. Propriedades físicas .....	9
4.3.1. Densidade .....	9
4.3.2. Retratibilidade .....	10
4.4. Propriedades da superfície.....	10
4.4.1. Rugosidade .....	10
4.4.2. Molhabilidade.....	11
4.5. Composição química – Teor de extrativos .....	12
4.6. Avaliação Não Destrutiva (AND) .....	13
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. HIPÓTESE.....</b>	<b>17</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
3.1. Material .....	18
3.2. Densidade .....	19
3.3. Rugosidade .....	19
3.4. Molhabilidade.....	21
3.5. Retratibilidade .....	21
3.6. Análises químicas.....	22
3.7. Análise estatística dos resultados .....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
4.1. Propriedades físicas .....	25
4.1.1. Densidade .....	25
4.1.2. Retratibilidade .....	26
4.2. Propriedades da superfície – rugosidade e molhabilidade .....	29
4.3. Composição química .....	37
4.4. Agrupamento das lâminas por meio das variáveis canônicas .....	38
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>

<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>43</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>2. HIPÓTESE</b> .....	<b>44</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
3.1. Confeção dos painéis LVL .....	45
3.2. Avaliação não-destrutiva (AND).....	47
3.3. Propriedades mecânicas .....	48
3.3.1. Ensaio de resistência à flexão estática .....	48
3.3.2. Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras .....	49
3.3.3. Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola.....	50
3.4. Propriedades físicas - ensaios de densidade, absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura .....	51
3.5. Análise estatística .....	52
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>53</b>
4.1. Avaliação não-destrutiva .....	53
4.2. Propriedades físicas .....	56
4.2.1. <i>Stress Wave Timer</i> nas lâminas .....	56
4.2.2. Densidade .....	57
4.2.3. Absorção de água e inchamento em espessura.....	58
4.2.4. Taxa de não-retorno em espessura.....	61
4.3. Propriedades mecânicas .....	61
4.3.1. Resistência à flexão estática ( <i>flastwise</i> ) .....	61
4.3.2. Resistência à compressão paralela às fibras .....	64
4.3.3. Resistência ao cisalhamento paralelo à linha-de-cola .....	66
4.4. Estimativa das propriedades mecânicas .....	68
4.5. Avaliação das combinações sugeridas pela análise de variáveis canônicas.....	72
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>76</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>90</b>
<b>A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 1</b> .....	<b>90</b>
<b>B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 2</b> .....	<b>94</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios de contração das lâminas estudadas.....	26
Tabela 2. Variações de Ganho de Massa e Ganho de Volume.....	28
Tabela 3. Parâmetro de rugosidade observado para as faces com e sem fendas das lâminas estudadas.....	30
Tabela 4. Valores médios da diferença do ângulo de contato após 10 segundos e o ângulo de contato inicial observados para as diferentes faces das lâminas. ....	35
Tabela 5. Percentuais dos constituintes químicos observados para as espécies estudadas. ....	38
Tabela 6. Autovalores, variância acumulada e coeficientes de ponderação das características envolvidas.....	39
Tabela 7. Delineamento Experimental e confecção dos painéis. ....	45
Tabela 8. Propriedades físicas do adesivo PVAc. ....	46
Tabela 9. Valores médios para a velocidade de propagação da onda gerada pelo <i>Stress Wave Timer</i> ( $SW_L$ ) nas lâminas das espécies estudadas. ....	56
Tabela 10. Valores médios da velocidade do <i>stress wave</i> nas lâminas e nos painéis LVL.....	57
Tabela 11. Valores médios para a taxa de não-retorno em espessura (TNRE %). ....	61
Tabela 12. Estatística descritiva das propriedades das lâminas.....	90
Tabela 13. Análise de variância para o efeito da espécie nas propriedades estudadas.....	91
Tabela 14. Análise de variância para o efeito da superfície na Rugosidade – sem fendas ( $R_aSF$ ) e com fendas ( $R_aCF$ ) – das espécies estudadas. ....	92
Tabela 15. Análise de variância para o efeito da superfície na Molhabilidade – sem fendas ( $\Delta\Theta SF$ ) e com fendas ( $\Delta\Theta CF$ ) – das espécies estudadas. ....	92
Tabela 16. Correlações entre a densidade aparente ( $\rho - g/cm^3$ ) e a rugosidade das espécies estudadas.....	93
Tabela 17. Correlações entre a molhabilidade e a rugosidade da face superior, sem fendas. ...	93
Tabela 18. Estatística descritiva da densidade ( $\rho_{LVL}$ ) dos painéis LVLs. ....	94
Tabela 19. Estatística descritiva da absorção de água (ABS %) dos painéis LVLs. ....	94
Tabela 20. Estatística descritiva do inchamento em espessura (IE %) dos painéis LVLs. ....	95
Tabela 21. Estatística descritiva da taxa de não-retorno em espessura (TNRE %) dos painéis LVLs.....	95
Tabela 22. Análise de variância para o efeito do tratamento na densidade ( $\rho_{LVL}$ ) dos painéis.....	95
Tabela 23. Análise de variância para o efeito do tratamento na Absorção de água (ABS).....	96
Tabela 24. Valores médios da absorção de água (ABS %) .....	96
Tabela 25. Análise de variância para o efeito do tratamento no Inchamento em Espessura (IE). ....	96
Tabela 26. Valores médios de inchamento em espessura (IE %). ....	97
Tabela 27. Análise de variância para o efeito do tratamento na Taxa de não-retorno em espessura (TNRE %). ....	97
Tabela 28. Estatística descritiva das variáveis provenientes da avaliação não destrutiva.....	98
Tabela 29. Análise de variância para o efeito do tratamento nas variáveis provenientes da avaliação não destrutiva (AND). ....	98
Tabela 30. Estatística descritiva das propriedades mecânicas.....	99
Tabela 31. Análise de variância para o efeito do tratamento nas propriedades mecânicas. ....	99
Tabela 32. Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função da velocidade de propagação da onda gerada pelo equipamento <i>Stress Wave Timer</i> ( $SW_V$ ). ....	100
Tabela 33. Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função em função do Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_{dsw}$ ). ....	101
Tabela 34. Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função da velocidade de propagação da onda gerada pelo equipamento Ultrassom ( $V_{LL}$ ). ....	102

Tabela 35. Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função do Coeficiente de Rigidez ( $C_{LL}$ ). .....	103
Tabela 36. Correlações entre as propriedades não-destrutivas, mecânicas e físicas. ....	102
Tabela 37. Autovalores, variância acumulada e coeficientes de ponderação das características envolvidas. ....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Painéis LVLS. ....	5
Figura 2. Processo geral da produção de painéis LVL .....	6
Figura 3. Vigas em Perfil “I” com flange de LVL. ....	6
Figura 4. Possíveis comportamentos de uma gota sobre uma superfície rugosa.....	11
Figura 5. Movimentos de molhamento em superfície porosa .....	12
Figura 6. A) Lâminas na câmara de climatização; B) Croqui das amostras (50 mm x 50 mm) retiradas para a caracterização das lâminas; C) Amostras identificadas, numeradas e separadas por espécie. ....	18
Figura 7. A) Croqui das medições de largura, comprimento e espessura das amostras; B) imagem da amostra com pontos de identificação. ....	19
Figura 8. Rugosímetro utilizado para caracterizar a superfície das lâminas. ....	20
Figura 9. Efeito da barra de pressão na qualidade das lâminas – Fendilhamento. ....	20
Figura 10. Goniômetro utilizado para realização dos ensaios de molhabilidade. ....	21
Figura 11. Saturação das amostras. ....	22
Figura 12. A) moinho de facas; B) sistema de peneiras vibratórias; C) fração retida entre as peneiras de 60 e 40 <i>mesh</i> , separadas e identificadas. ....	22
Figura 13. Andamento das Análises Químicas. A) tubo de celulose identificado; B) pesagem do material moído; C) processo de esterilização dos balões; D) extrator Soxhlet; E) balão com amostra seca; F) amostras em banho-maria – ensaio de lignina insolúvel.....	23
Figura 14. Valores médios de massa específica aparente para as diferentes espécies estudadas.....	25
Figura 15. Variação do Volume e da Massa durante a imersão em água e durante permanência em câmara climática para as lâminas de Amescla.....	27
Figura 16. Isotermas de sorção. ....	29
Figura 17. Perfis típicos de rugosidade observados para as faces sem fendas (A e C) e com fendas (B e D); amescla e curupixá, respectivamente. ....	32
Figura 18. Perfis típicos de rugosidade observados para as faces sem fendas (A e C) e com fendas (B e D); copaíba e visgueiro, respectivamente.....	33
Figura 19. Perfil típico de rugosidade observado para as faces sem fendas (a) e com fendas (b) das lâminas de paricá.....	34
Figura 20. Variação dos ângulos de contato médios finais ( $\Theta_{f10}$ ) e iniciais ( $\Theta_i$ ), sem e com fendas. ( $\Theta_i$ = ângulo de contato medido no momento da deposição da gota; $\Theta_{f10}$ = ângulo de contato medido 10 segundos após a deposição da gota). ....	36
Figura 21. Dispersão dos escores das cinco espécies em relação às duas primeiras variáveis canônicas (VC1 e VC2), tendo como base seis características. (1 – Amescla; 2 – Copaíba; 3 – Curupixá; 4 – Paricá; 5 – Visgueiro).....	41
Figura 22. Confeção dos painéis. A) Lâminas e adesivo utilizados; B) Acompanhamento da temperatura durante a prensagem dos painéis. ....	46
Figura 23. A) Exemplo esquemático da determinação do tempo de trânsito da onda de tensão gerada pelo equipamento Stress Wave na posição <i>flatwise</i> (Fonte: adaptado de SOUZA et al., 2008); B) Ultrassom em processo de calibragem no laboratório. ....	47

Figura 24. Realização do ensaio de resistência à flexão estática com aplicação da carga centralizada sobre dois apoios. ....	48
Figura 25. Realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras. ....	49
Figura 26. A) Croqui do corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo à linha de cola; B) Corpo-de-prova com calço e com cadeira para encaixe na célula de carga na 3ª linha de cola (seta vermelha). ....	50
Figura 27. Realização dos ensaios para determinação das propriedades físicas dos painéis confeccionados: A) Mensurando a espessura com o auxílio de relógio comparador; B) Corpos-de-prova submersos em água. ....	51
Figura 28. Valores médios das velocidades de propagação das ondas. A) velocidade de propagação do stress wave; B) velocidade de propagação do ultrassom. ....	53
Figura 29. Valores médios das variáveis acústicas. A) módulo de elasticidade dinâmico; B) coeficiente de rigidez. ....	55
Figura 30. Valores médios das densidades dos painéis. ....	58
Figura 31. Comportamento dos painéis diante do ensaio de absorção de água. ....	58
Figura 32. Comportamento dos painéis diante do ensaio de absorção de água. ....	59
Figura 33. Valores médios: A) Módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) Módulo de elasticidade ( $E_m$ ). ..	62
Figura 34. Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c,0}$ ). ....	65
Figura 35. Delaminação em corpo-de-prova do tratamento 1 (painéis LVL produzidos com lâminas de amescla e paricá). ....	66
Figura 36. Valores médios da resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). ....	66
Figura 37. Ruptura em cisalhamento paralelo à linha de cola para os painéis confeccionados por tratamento. ....	67
Figura 38. Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função da velocidade de propagação da onda do <i>stress wave</i> ( $SW_P$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) Resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). ....	68
Figura 39. Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dswp}$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). ....	69
Figura 40. Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função da velocidade de propagação da onda do ultrassom ( $V_{LL}$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). ....	71
Figura 41. Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função do Coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). ....	71
Figura 42. Dispersão dos escores dos oito tratamentos em relação às duas primeiras variáveis canônicas (VC1 e VC2), tendo como base as dezesseis propriedades estudadas. A) agrupamento esperado; B) agrupamento encontrado. ....	74





## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente existe uma grande necessidade em se pesquisar estruturas de madeiras que possibilitem qualidade e resistência. A vasta disponibilidade de madeira no Brasil, fazem do Brasil uma nação potencial no desenvolvimento de novos materiais estruturais de madeira.

O relativo número de 230 espécies madeireiras industrialmente aproveitadas pode ser considerado insignificante em vista da diversidade de espécies arbóreas (BARBOSA et al., 2001). Mesmo assim, o O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de madeira tropical; entretanto dos 48,60 milhões m<sup>3</sup>/ano de madeira produzidos, somente 9% é exportado o que se justifica pela origem não definida de 80% da madeira produzida. Esta pequena contribuição de madeira da Amazônia ao mercado se deve à exploração concentrada em poucas espécies conhecidas, falta de infraestrutura e baixa qualidade da madeira devido ao baixo nível tecnológico; conseqüentemente existe um grande desperdício, onde apenas 30% de uma tora é aproveitado, tornando-se 70% lixo (CLEMENT; HIGUCHI, 2006).

Entretanto, a obrigatoriedade de planos de manejo e a legislação vigente de concessões florestais, indicam um mercado madeireiro promissor (FERRAZ; MOTTA, 2002; SABOGAL et al., 2006). Revela-se então a necessidade da agregação de valor por meio de tecnologia aos produtos finais, destacando-se que a madeira, assim como seus derivados, são renováveis, biodegradáveis, duráveis (dependendo do tratamento utilizado), imobilizam carbono em sua estrutura e apresentam vantagens em relação a outros materiais de construção (PFEIL; PFEIL, 2007).

Nesse contexto, os produtos engenheirados de madeira (PEM) surgem em resposta à demanda do mercado por alternativas viáveis a outros materiais de construção. A Associação de Madeira Engenheirada dos Estados Unidos (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2010) divide os PEM em quatro categorias: i) Painéis Estruturais – Compensados e OSB; ii) Madeira Laminada Colada (MLC); iii) Compostos Estruturais – (LVL, PSL, OSL, LSL); iv) Vigas em Perfil “I”.

Destes, os painéis LVL (*Laminated Veneer Lumber*) diferenciam-se dos compensados tradicionais porque são formados por lâminas de madeira coladas, umas sobre as outras, com as fibras dispostas paralelamente (LAM, 2001; STARK et al., 2010). Sua fabricação tem como objetivo gerar produtos com várias dimensões e propriedades mecânicas equivalentes ou superiores às da madeira sólida (SHUPE et al., 1997). O processo de produção do LVL

contempla a secagem das lâminas, classificação (visual ou a partir de testes não destrutivos) e guilhotinagem das lâminas secas (ABIMCI, 2009). Geralmente as lâminas de alta qualidade são posicionadas nas faces do painel e as de baixa qualidade no miolo (LAM, 2001).

Em geral, os painéis LVL são formados com material da mesma espécie. A mistura de espécies na fabricação dos PEM tem com o objetivo aumentar o rendimento das toras e os padrões de qualidade exigidos pelo mercado interno e externo. Nesse âmbito inovador, é fundamental na criação de novas tecnologias para realizar avaliações quanto à capacidade de adesão do material e sua resistência.

No Brasil, as pesquisas visam avaliar a adequação de matéria-prima oriunda de reflorestamento, utilizando em sua maioria espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (PIO, 2002; IWAKIRI et al., 2008; BORTOLETTO, 2009; SOUZA et al., 2011). Existem poucos trabalhos que utilizam madeiras tropicais como matéria-prima e poucos que também consideram a mistura de espécies no processo de fabricação (IWAKIRI et al., 2010).

## **2. OBJETIVO GERAL**

Propor o agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a produção de painéis de lâminas paralelas (LVL) e avaliar sua viabilidade técnica.

### **3. HIPÓTESE GERAL**

É viável tecnicamente a produção de painéis LVL por meio da mistura de lâminas de madeiras de espécies amazônicas.

## 4. REVISÃO GERAL DE LITERATURA

### 4.1. Painel de Lâminas Paralelas (LVL)

Compostos Estruturais de Madeira (SCL – *Structural Composite Lumber*) foram desenvolvidos em resposta à crescente demanda por produtos de alta qualidade. São caracterizadas por lâminas de madeira coladas em tamanhos variados. Dentre os tipos de compostos encontra-se o LVL (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2010).

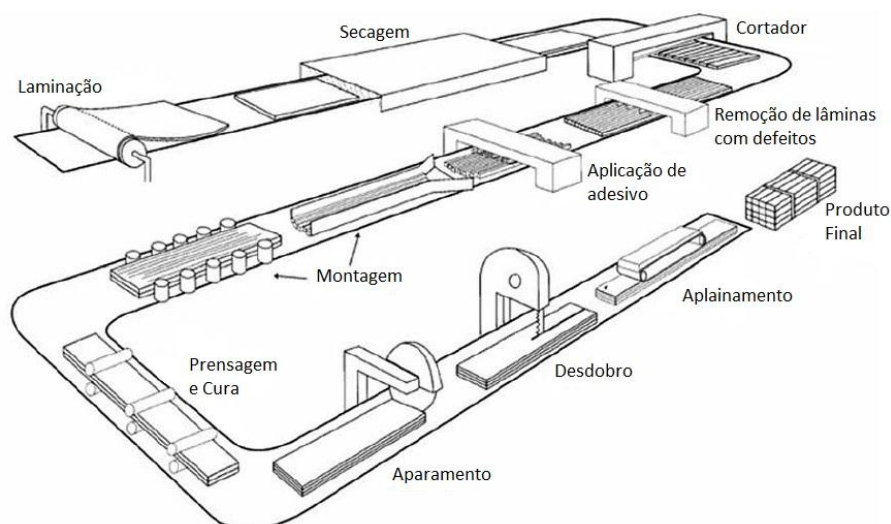
Os painéis LVL (Figura 1) são materiais engenheirados confeccionados com lâminas colada de espessura variando entre 0,3 a 6,3 mm. A direção das lâminas é paralela umas as outras e o adesivo estrutural deve ser a prova d'água com o objetivo de compor um produto sólido, com seções definidas e comprimento limitado pelo processo de confecção ou pelo transporte (SELLERS, 1985; CARVALHO et al., 2004; SOUZA; TEIXEIRA, 2002; USDA, 2010).



**Figura 1.** Painéis LVLs.

(Fonte: [http://www.pacificwoodtech.com/pdf/PWC\\_MiniUserGuide.pdf](http://www.pacificwoodtech.com/pdf/PWC_MiniUserGuide.pdf))

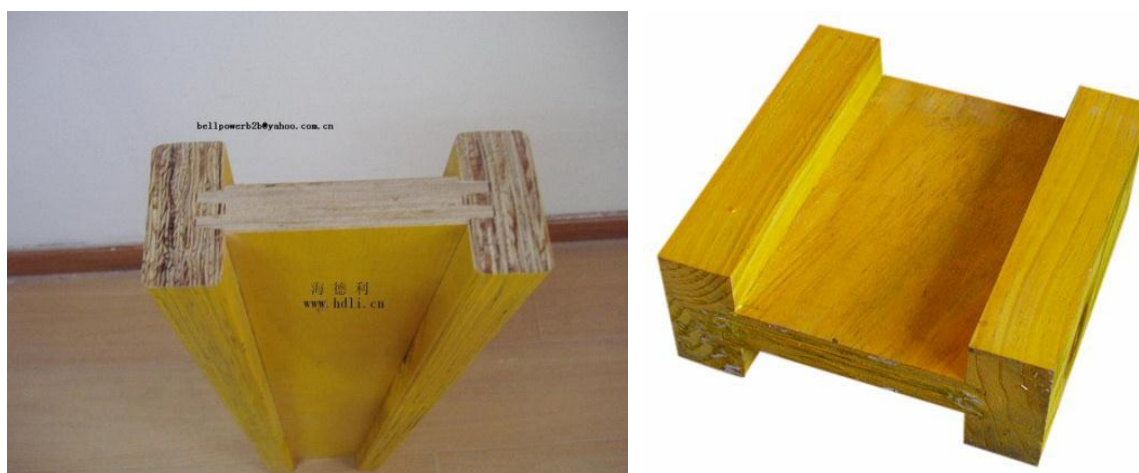
Para se obter um LVL de alta resistência e qualidade, as lâminas utilizadas na fabricação devem ser cuidadosamente selecionadas para que o produto possa atingir as propriedades desejadas. Para painéis de maior dimensão podem ser utilizadas prensas contínuas, cortando o material no comprimento desejado (USDA, 2010) (Figura 2).



**Figura 2.** Processo geral da produção de painéis LVL  
(Fonte: adaptado de USDA, 2010)

A confecção do painel LVL permite a formação de um material engenheirado mais uniforme na resistência e na densidade (BOHLEN, 1972). Estes painéis apresentam como vantagens sobre a madeira sólida, o aumento na estabilidade dimensional e a uniformidade nas propriedades mecânicas (KILLIC et al., 2006). Estas propriedades podem ser melhoradas aumentando-se a densidade do painel, seja por compressão durante o processamento do material ou por impregnação das lâminas por material polimerizado (OZARSKA, 1999).

O LVL é um produto versátil podendo ser utilizado em estruturas internas e externas, acabamento, mobília, etc. (CARVALHO et al., 2004). De forma ampla, a principal utilização desse tipo de painel é para os flanges de vigas em perfil “I” (Figura 3) muito utilizadas na América do Norte e Europa.



**Figura 3.** Vigas em Perfil “I” com flange de LVL.  
(Fonte: [http://www.bizearch.com/trade/I\\_joist\\_LVL\\_9735\\_2696.htm](http://www.bizearch.com/trade/I_joist_LVL_9735_2696.htm))

## 4.2. Espécies

### 4.2.1. *Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.

A espécie *Trattinnickia burseraefolia* cujos nomes populares mais comuns são amescla, amesclão, breu-sucuruba, pertence à família Burseraceae. Quase todos os gêneros desta família apresentam substâncias balsâmicas no lenho (JOLY, 2002). Sua madeira é usada principalmente em compensados, sendo sua introdução como madeira serrada recente (IPT, 2009).

É uma árvore com altura comercial média de 14 metros, tronco reto a levemente torcido e cilíndrico. Cerne, alburno e anéis de crescimento pouco distintos e massa específica média de 0,44 g/cm<sup>3</sup> (SFB, 2013). Parênquima axial, invisível mesmo sob lente; raios, visíveis sob lente no topo e na face tangencial, finos e numerosos; vasos, visíveis a olho nu, pequenos a médios, poucos, solitários e múltiplos, vazios ou obstruídos por tilos (IPT, 2009).

### 4.2.2. *Copaifera* sp.

O gênero *Copaifera*, pertence à família Leguminosae, subfamília Caesalpinioideae, é constituído de 72 espécies arbóreas, sendo 16 exclusivas da flora brasileira (RECORD e HESS, 1972). Sua identificação botânica é difícil, sendo realizada, na maioria das vezes, segundo características das flores. As espécies deste gênero são em geral árvores com altura de 15 a 40 metros, conhecidas em geral como copaíbas ou pau-d'óleo. Apresentam em sua madeira a seguinte característica comum: presença de parênquima axial marginal com muitos canais secretores intercelulares axiais que contém o óleo-resina. Este líquido de odor forte apresenta propriedades anti-inflamatórias sendo utilizado como ingrediente na fabricação de medicamentos, vernizes e combustível (ALENCAR, 1982; ALONSO 1998).

As madeiras das espécies de *Copaifera* sp. apresentam em geral cerne de cor castanho avermelhada. Além do parênquima com canais oleosos, apresenta também parênquima paratraqueal vasicêntrico e apotraqueal difuso escasso, frequentemente cristalífero; sua massa específica varia de 0,70 a 0,98 g/cm<sup>3</sup>; são fáceis de serem trabalhadas e muito duráveis permitindo bom acabamento (RECORD; HESS, 1972; IPT, 2009).

Por serem muito semelhantes entre si quanto ao peso, aspecto e características anatômicas, é muito difícil identificá-las e, por isso, comercialmente são tratadas como iguais, sem distinção de espécies (MAINIERI; CHIMELO, 1989).



#### 4.2.3. *Micropholis* sp.

O gênero *Micropholis*, pertence à família Sapotaceae. São conhecidas como curupixá, rosadinho, abiurana, guajará, pau-doce ou balata. Sua altura comercial varia de 9 a 15 metros. Sua madeira apresenta cerne e alburno indistintos, cheiro imperceptível e a sua densidade varia de 0,67 a 0,78 g/cm<sup>3</sup> (SFB, 2013). Seus vasos são visíveis a olho nu, solitários em maioria, múltiplos radiais até três, pequenos a médios, alguns obstruídos por substância branca; parênquima axial pouco visível a olho nu, em finas linhas; raios pouco distintos a olho nu, estreitos, numerosos; camadas de crescimento pouco distintas (NISGOSKI, 2003).

Este gênero tem sido estudado como uma espécie tropical alternativa para a geração de produtos de maior valor agregado, tais como pisos maciços e engenheirados (BATISTA et al., 2012).

#### 4.2.4. *Schizolobium amazonicum* (Huber) ex. Ducke

O Paricá pertence à família Caesalpiniaceae e ocorre naturalmente na Amazônia brasileira (CORRÊA, 1985). Atualmente se destaca por ser uma das espécies mais plantadas na região norte do Brasil, cultivada pelas empresas madeireiras com a finalidade de produção de lâminas para a manutenção de painéis (VIDAURRE, 2010). É uma árvore de fuste reto e pouca incidência de nós, o que aumenta o rendimento e a qualidade das lâminas.

Apresenta cerca de 14 metros de altura comercial média e sua madeira apresenta cerne pouco distinto do alburno. A massa específica varia de 0,40 a 0,63 g/cm<sup>3</sup> (PAULA; ALVES, 1997). Apresenta pouco parênquima axial, poucos poros solitários, raios homogêneos, fibras de paredes finas e curtas. Segundo Rosa (2006) apesar da madeira de paricá apresentar baixa resistência e ser susceptível ao ataque de fungos, insetos e cupins, esta tem espaço reservado no mercado madeireiro, pois sua madeira é de fácil trabalhabilidade. A madeira de paricá é consideravelmente utilizada para fabricação de compensados e é considerada promissora para a obtenção de celulose e papel (PEREIRA et al., 1982).

#### 4.2.5. *Parkia pendula* (Willd.) Walp.

Pertencente à família Fabaceae, esta espécie é comum nos estados do Amazonas e Pará, observada ainda em Alagoas, Bahia e Pernambuco. Apresenta porte significativo, variando de 20 até 30 metros de altura, fuste cilíndrico, retilíneo e ocasionalmente com pequenas sapopemas. Sua madeira é de baixa densidade (0,50 g/cm<sup>3</sup>), cerne e alburno pouco

diferenciados; seu processamento é fácil, sendo macia ao corte, boa de plainar, lixar e pregar. É fácil de preservar, demonstrando bastante permeabilidade às soluções preservantes, quando submetida a impregnação sob pressão (LOUREIRO et al., 2000).

Conhecida por faveira-bolota, visgueiro, angelim saia, oitizinho, entre outros, sua madeira apresenta parênquima axial distinto a olho nu, predominantemente aliforme, de aletas curtas ou longas, ligando e envolvendo os poros. Os poros são distintos sem auxílio de lente e vazios. As linhas vasculares são visíveis a olho nu, altas e retas. Geralmente é empregada na construção civil, móveis de pouco valor, lâminas para compensados e canoas (LOUREIRO et al., 2000).

### **4.3. Propriedades físicas**

#### 4.3.1. Densidade

A densidade madeira apresenta relação inversa com a porosidade e com a capacidade de penetração do adesivo na estrutura lenhosa. Para madeira de baixa densidade, ocorre uma maior penetração do adesivo, o que pode resultar em linha de cola “faminta” (IWAKIRI, 2005). Enquanto que as madeiras de alta densidade são difíceis de colar por possuírem paredes de células espessas e lúmens pequenos, então a penetração do adesivo é limitada (USDA, 2010).

Lobão; Gomes (2006) pesquisaram a qualidade da adesão da madeira de *Eucalyptus sp.* de diferentes densidades (0,82 e 0,58 g/cm<sup>3</sup>). Os resultados mostraram que nas madeiras de menor densidade, não houve diferença significativa entre os valores de resistência obtidos nos corpos-de-prova sólidos e das juntas coladas. Entretanto, nas madeiras de alta densidade os valores de resistência, entre as amostras sólidas e coladas, foram diferentes estatisticamente. Com isso, os autores concluem que madeiras de altas densidades são de difícil colagem, por essas permitirem pouca penetração do adesivo, ocasionando assim, uma junta de qualidade inferior às obtidas com madeiras de densidades menores.

A maioria dos trabalhos descreve a relação citada (AMORIM; DEL MENEZZI, 2010; ZANGIÁCOMO, 2003; AYARKWA et al., 2010). Entretanto, alguns trabalhos apresentam resultados contraditórios (ÖZÇİFÇİ; YAPICI, 2008) o que pode ter relação com a gramatura do adesivo utilizado, pressão exercida no momento, teor de extrativos ou preparação da superfície, que interferem diretamente na colagem. A densidade não pode ser avaliada em

separado, pois se relaciona com outras variáveis como teor de umidade e varia conforme o tamanho e forma das células, espessura da parede celular e porcentagem de lenho tardio e de raios (BODIG; JAYNE, 1992).

#### 4.3.2. Retratibilidade

A retratibilidade da madeira depende da posição em que se encontra no tronco, da idade da árvore, da espécie e suas características, e, principalmente das faces. Sabe-se que a contração volumétrica é maior que a tangencial e esta por sua vez é duas vezes maior que a radial, sendo a longitudinal a menor variação (PFEIL; PFEIL, 2007). Silva et al. (2006) estudando *Eucalyptus grandis*, encontraram valores médios de retratibilidade volumétrica de 18,11%, tangencial 10,14%, radial 6,09% e longitudinal 0,45%. Neste mesmo trabalho, encontrou-se efeito da idade, variação radial e do sentido medula-casca na retratibilidade volumétrica. Observou-se um aumento da retratibilidade em função da idade e da posição radial, no sentido medula-casca.

De acordo com Panshin; De Zeeuw (1980), as contrações transversais são menores próximo à medula, crescendo rapidamente desta para a casca. Os autores afirmam que esta mudança tem relação com a redução do ângulo microfibrilar na parede celular, com o aumento do comprimento da célula e do teor de celulose.

### **4.4. Propriedades da superfície**

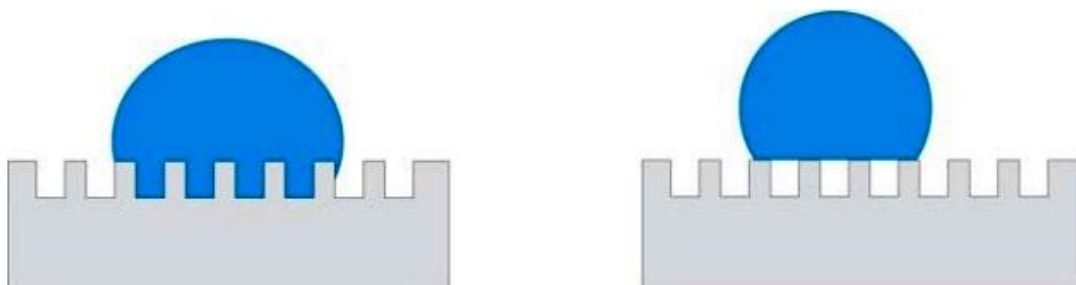
#### 4.4.1. Rugosidade

A rugosidade interfere na interação entre a superfície da madeira com líquidos em geral. Ela é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade de lâminas de madeira (DUNDAR et al., 2008). Depende da estrutura anatômica, grã, largura dos anéis de crescimento, raios, nós, presença da madeira de reação e relação de lenho inicial e tardio (TAYLOR et al., 1999) e do processamento da superfície. Pode ser definida nas escalas macro, micro, nano molecular (PIAO et al., 2010).

A superfície pode ser avaliada por parâmetros objetivos tais como a rugosidade antes e após o acabamento (MALKOÇOĞLU, 2007) e é intimamente relacionada com a molhabilidade, pois quanto maior a rugosidade, maior a hidroflicidade da superfície (PIAO et al., 2010). De acordo com Lemaster (1999) a rugosidade da madeira pode ser avaliada por meio do uso de rugosímetros de contato e não contato, que são utilizados para avaliar outros

materiais, como o metal. A técnica mais comum usa um sensor de apalpação que mecanicamente mede a altura da superfície ao longo de uma linha. A partir do perfil obtido são determinados vários parâmetros para avaliar a rugosidade.

A rugosidade se relaciona com outras características da madeira, como a molhabilidade. Piao et al. (2010) afirmam que uma alta rugosidade muitas vezes significa uma maior superfície de contato para algum líquido se espalhar. Desta forma quanto maior a rugosidade, a hidrofilicidade (molhabilidade) da superfície tende a aumentar. Buyuksari et al. (2011) estudaram a relação da rugosidade com a molhabilidade da madeira de *Fraxinus angustifolia*. Os autores encontraram que quanto maior a rugosidade, menor o ângulo de contato e, conseqüentemente, maior molhabilidade e melhor adesão da madeira. Entretanto, Li et al. (2007) apontam um paradoxo (Figura 4): superfícies extremamente rugosas geram ar aprisionado nos micro/nano espaços e diminuem assim a área molhável, tornando a superfície hidrofóbica. A gota de água pode penetrar nas asperezas da superfície ou ficar suspensa sobre as asperezas. Amorim et al. (2013) não encontraram relação direta da rugosidade com a molhabilidade em algumas espécies tropicais. Portanto, a rugosidade define a hidrofilicidade e a hidrofobicidade do substrato.



**Figura 4.** Possíveis comportamentos de uma gota sobre uma superfície rugosa. (Fonte: LI et al, 2007).

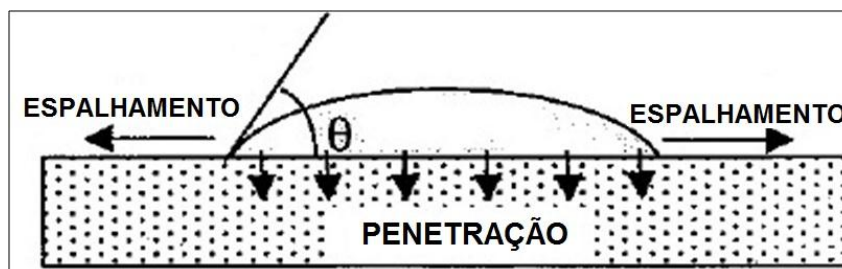
#### 4.4.2. Molhabilidade

A molhabilidade é uma propriedade que indica a facilidade ou não, de um determinado líquido penetrar pelas estruturas celulares da madeira ou de outros materiais; é a facilidade e eficácia com a qual um líquido penetra e se espalha sobre uma superfície sólida (GRAY, 1962). Esta pode ser caracterizada utilizando parâmetros termodinâmicos como os ângulos de contato, energia livre de superfície e trabalho de adesão (WALINDER, 2000; WALINDER, 2002).

Este fenômeno está relacionado com as interações moleculares entre sólidos e líquidos em contato. Assim como a densidade, a molhabilidade se inter relaciona com outras variáveis

sendo dependente da espécie, anatomia (macro e microestrutura), propriedades físicas (como o teor de umidade e a densidade), propriedades químicas (como teor de lignina holocelulose e extrativos), envelhecimento, defeitos e métodos de processamento mecânico (como lixa e plaina) (FREEMAN, 1959; CRUZ 2006; PIAO et al., 2010).

Todas essas relações definem a interação do líquido com a madeira e conseqüentemente, implicam na formação do ângulo de contato, no comportamento da interface sólido/líquido/gás, no espalhamento sobre a superfície do sólido e na penetração na superfície porosa do mesmo. O ângulo de contato de um líquido sobre a superfície de um sólido ( $\theta$  - “*sessile drop method*” – Figura 5) é geralmente considerado como um dos métodos mais utilizados para determinação da molhabilidade e é uma das técnicas mais usadas. (CARVALHO, 1990).



**Figura 5.** Movimentos de molhamento em superfície porosa  
(Fonte: Adaptado de Shi e Gardner, 2001)

#### 4.5. Composição Química – Teor de Extrativos

Os extrativos são substâncias formadas a partir da modificação dos carboidratos produzidos na fotossíntese. Sua composição consiste em um grande número de ceras, alcalóides, compostos fenólicos, mucilagens, gomas, resinas, terpenos e óleos essenciais (OLIVEIRA et al., 2012). De acordo com Panshin; De Zeeuw (1980) e Tsoumis (1968), os extrativos atuam como mecanismo de defesa da planta contra microorganismos e contribuem para a cor e o odor da madeira.

Em sua forma natural, a madeira apresenta características hidrofílicas. Entretanto, ao submetê-la a algum tipo de tratamento, o produto utilizado, o tempo despendido entre a usinagem e a confecção e a temperatura da prensagem, afetam sua molhabilidade. Uma das alterações possíveis, dependendo da concentração e da natureza dos extrativos, é sua migração para a superfície da madeira (CHRISTIANSEN, 1990; SERNEK, 2002). O teor de umidade e o método de secagem é que definem esse movimento de massa. Buscando compreender essa relação, Gray (1962) avaliou o ângulo de contato para 19 espécies; a

variação encontrada para os resultados foi atribuída ao alto teor de resina e ao alto teor de extrativos. A explicação para tal comportamento é encontrada no estudo de Hse e Kuo (1988), em que os autores concluem que o alto teor de extrativos, contamina a superfície, bloqueia as reações entre os componentes da madeira com o adesivo e assim reduz a resistência na linha de cola. Chen (1970) estudando o efeito da remoção dos extrativos na madeira de oito espécies tropicais concluiu que houve melhora na molhabilidade e na colagem, além de ter diminuído o pH.

Trabalhos analisando o teor de extrativos de madeiras tropicais são escassos (SANTANA; OKINO, 2007) e não relacionam os resultados obtidos com a molhabilidade e adesão da madeira. Mesmo exercendo influência assim como outras características, o teor de extrativos não é a motivo isolado na qualidade da adesão de madeiras. Dessa forma, se faz necessário avaliar as relações entre as características da madeira e a sua adesão a fim de se conhecer as relações das propriedades físicas e mecânicas com as químicas (TRUGILHO et al., 1996).

#### **4.6. Avaliação Não Destrutiva (AND)**

A avaliação não-destrutiva pode ser realizada em diversos tipos de materiais para a verificação de defeitos e/ou descontinuidades, sem alterar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, e também, sem interferir em seu uso posterior. Na madeira, a AND é empregada na sua caracterização, contribuindo para melhorar a competitividade deste material (ZANGIÁCOMO, 2003). As primeiras pesquisas relacionadas à AND para estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos (TARGA et al., 2005).

BUCUR (2006) afirma que a AND em materiais homogêneos e isotrópicos como o aço, plástico e cerâmicas, detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, tais irregularidades acontecem naturalmente. Inúmeras técnicas podem ser utilizadas para caracterização não destrutiva de madeiras. As técnicas empregadas neste estudo foram as seguintes:

- Propagação de ondas de ultrassom: consiste no fenômeno de reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material. A onda se reflete retornando até sua fonte geradora, se o obstáculo estiver numa posição perpendicular em relação ao feixe incidente (ROSS; PELLERIN, 1994)

- Ondas de tensão (*stress wave method*): aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação da onda induzida e a sua atenuação são os principais parâmetros analisados (ROSS; PELLERIN, 1994)

Atualmente, o uso de AND para classificação de lâminas em classes de resistência tem sido eficientemente utilizado pelas empresas fabricantes de LVL (KLEMAREWSKI, 2007).

# CAPÍTULO 1

---

## PROPRIEDADES DE LÂMINAS DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS LVL.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o advento dos adesivos, foram desenvolvidas tecnologias de transformação da tora em produtos recompostos de madeira. As características do produto final reconstituído são conferidas por meio da ligação adesiva entre os elementos da madeira, sua distribuição e orientação na estrutura do composto. Uma aplicação correta e penetração efetiva do adesivo permitem a formação de uma ligação de qualidade (AVENT, 1999). A escolha do tipo de adesivo é parte fundamental no processo de fabricação dos painéis LVL exigindo-se elevada resistência a umidade, já que estes serão destinados para o uso estrutural (SOUZA; TEIXEIRA, 2002).

O entendimento da funcionalidade dos adesivos é complexo. A começar da premissa que seu desempenho não é uma ciência em si, mas a combinação de várias ciências (ROWELL, 2005). O processo de colagem de madeira é então não somente influenciado pelas características do adesivo, mas também, pelas características da madeira e pelos parâmetros de controle do processo.

Variáveis como a espécie, densidade, retratibilidade, o teor de umidade, cerne ou alburno, ângulo da grã, face, porosidade, pH, teor de extrativos, química da superfície, secagem, molhabilidade, entre outros fatores, afetam direta e/ou indiretamente a colagem da madeira (ROWELL, 2005). Outro fator determinante na produção de painéis é a contração e o inchamento da madeira, que varia em seus três eixos estruturais (DEL MENEZZI, 2006). Na busca constante pelo aperfeiçoamento destes produtos, existem metodologias utilizadas para a sua estabilização dimensional e de seus compósitos.

O número de pesquisas relacionadas ao assunto é significativo. Os tópicos mais abordados são quanto à resistência de colagem em função de diferentes espécies de madeira, com destaque para as espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, diferentes níveis de densidade, diferentes gramaturas e pressões empregadas na colagem (LIMA et al., 2001; SANTOS; DEL MENEZZI, 2009).



As pesquisas relacionadas à mistura de lâminas de madeira para fabricação de painéis LVL ainda são escassas, tanto no Brasil quanto no exterior devido à dificuldade de associar as características das madeiras ao processo de fabricação.

Ante o exposto, o objetivo deste primeiro capítulo é analisar as propriedades de lâminas de cinco espécies madeireiras amazônicas de modo que seja possível agrupá-las facilitando a mistura destas na produção de painéis LVL.

## **2. HIPÓTESE**

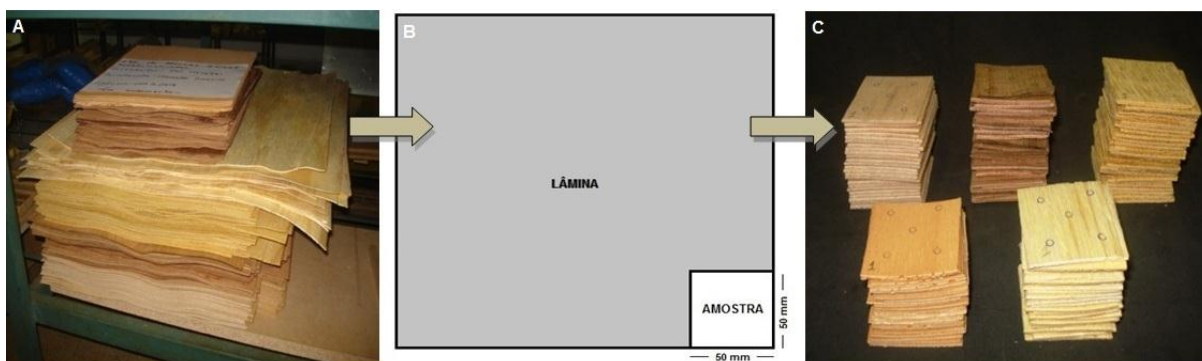
É possível agrupar espécies madeireiras amazônicas em função de suas propriedades físicas, de superfície e químicas a partir de uma análise de variáveis canônicas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material

Foram utilizadas lâminas de cinco espécies amazônicas. As lâminas de *Trattinnickia burseraefolia* (amescla – 2,32 mm espessura), *Copaifera sp.* (copaíba – 2,27 mm espessura), *Micropholis sp.* (curupixá – 1,58 mm espessura) e *Parkia pendula* (visgueiro – 2,45 mm espessura). Foram doadas pela empresa Madeiranit<sup>®</sup> Madeiras Ltda., localizada no município de Sinop (MT). Estas foram obtidas por desenrolamento em torno laminador e secas em estufa. As lâminas de *Schizolobium amazonicum* (paricá – 1,84 mm espessura) foram doadas pela empresa Portil<sup>®</sup>, localizada no município de Dom Eliseu (PA). Diferentemente das outras lâminas, o processo de laminação do Paricá foi realizado em um torno desfolhador com rolos de tração e sem garras (MELO, 2012).

O material foi identificado no Laboratório de Anatomia da Madeira (*Index Xylarium* FPBw) do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), por meio de análise macroscópica e comparação com material depositado na xiloteca; as lâminas de *Copaifera sp.* e *Micropholis sp.* foram identificadas somente até o nível de gênero. Logo em seguida, foi armazenado em câmara climática com umidade relativa ( $65 \pm 2\%$ ) e temperatura ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) controlada até apresentarem massa constante. Para a realização dos ensaios foram retirados corpos-de-prova (CPs) com dimensões de 50 mm x 50 mm da parte inferior direita das lâminas, totalizando 125 amostras, 25 por espécie. Os CPs foram numerados em sequência e agrupados de acordo com a espécie (Figura 6).

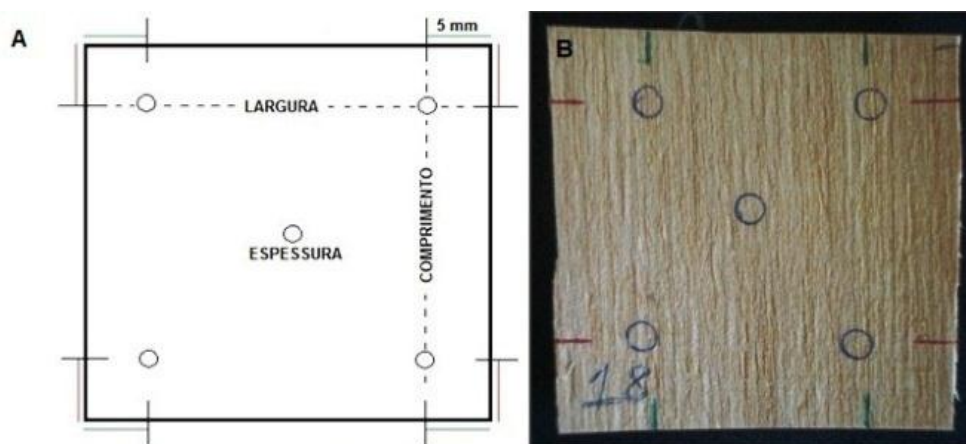


**Figura 6.** A) Lâminas na câmara de climatização; B) Croqui das amostras (50 mm x 50 mm) retiradas para a caracterização das lâminas; C) Amostras identificadas, numeradas e separadas por espécie.

Foram realizados com os 25 CPs de cada espécie, ensaios de densidade, rugosidade e molhabilidade. Em seguida foram divididos em vinte CPs realizou-se o ensaio de retratibilidade e com cinco, as análises químicas.

### 3.2. Densidade

A densidade aparente foi estimada pelo método gravimétrico após a determinação da massa e do volume das amostras, conforme recomendado pela norma ASTM D2395 (2010). Foram pesados e medidos 25 CPs de 50 mm x 50 mm para cada espécie; duas medidas em cada lado da amostra (comprimento e largura) foram tomadas com um paquímetro digital e cinco pontos foram mensurados com um relógio comparador digital para determinação da espessura das amostras (Figura 7).



**Figura 7.** A) Croqui das medições de largura, comprimento e espessura das amostras; B) imagem da amostra com pontos de identificação.

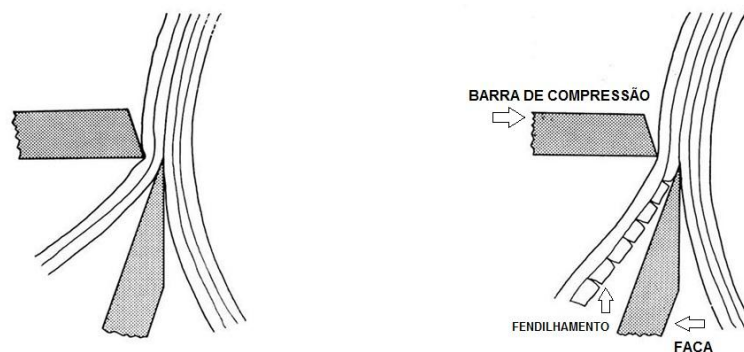
### 3.3. Rugosidade

Logo após o ensaio de densidade, as amostras das lâminas seguiram para a medição da rugosidade de sua superfície. As medições foram realizadas por meio do equipamento SurfTest SJ – 400 (Mitutoyo), de acordo com a norma JIS B 0601 (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD – JIS, 2001). Este equipamento, conhecido como rugosímetro, foi acoplado a um microcomputador, e configurado com *cut-off* de 0,8 mm e percurso de avaliação de 4 mm (Figura 8).



**Figura 8.** Rugosímetro utilizado para caracterizar a superfície das lâminas.

As medições foram feitas no sentido perpendicular às fibras, na parte central da amostra e em ambas as faces. A função deste tipo de análise foi avaliar se as características da superfície se alteram devido à formação de fendas provenientes da força aplicada pela barra de pressão durante o processo de laminação (Figura 9). A face superior, não apresentava fendas provenientes da barra de compressão utilizada na manufatura das lâminas, enquanto que a face inferior sim. O parâmetro avaliado foi o  $R_a$ , o qual fornece informações a respeito do perfil da superfície das amostras. Este parâmetro foi determinado de acordo com a equação 1.



**Figura 9.** Efeito da barra de pressão na qualidade das lâminas – Fendilhamento.  
(Fonte: Adaptado de Iwakiri, 2013).

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:  $R_a$  = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, em  $\mu\text{m}$ ;  $Y_i$  = Desvios do perfil, em  $\mu\text{m}$ .

### 3.4. Molhabilidade

A molhabilidade foi avaliada por meio de medições do ângulo de contato da gota sésil com o uso do Goniômetro DSA30 (Figura 10). Assim como na avaliação da rugosidade, também foram coletados dados da face superior e inferior das lâminas. Foi depositada uma gota com um volume de 20  $\mu\text{l}$  sobre ambas as faces do material e as medições foram realizadas a cada 2 segundos por um período de 60 segundos.



**Figura 10.** Goniômetro utilizado para realização dos ensaios de molhabilidade.

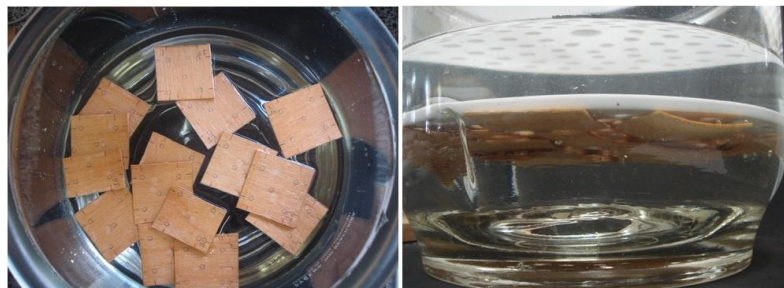
Os valores utilizados nas análises são resultado da diferença entre os ângulos de contato tomados aos 10 segundos após a deposição da gota ( $\Theta_{f10}$ ), e o ângulo de contato inicial ( $\Theta_i$ ) – Equação 2.

$$\Delta\theta = \theta_{f10} - \theta_i \quad (\text{Equação 2})$$

### 3.5. Retratibilidade

Para avaliar a estabilidade dimensional, 20 CPs de 50 mm x 50 mm foram submetidos a sucessivas sessões de pesagens e medições, com o auxílio de uma balança de precisão digital, um paquímetro digital e um relógio comparador digital. A massa de cada amostra foi obtida e nos mesmos pontos específicos, informados no ensaio de densidade, foram tomadas as medições de largura, comprimento e espessura. Posteriormente, estas amostras foram saturadas em água (Figura 11). A fim de acompanhar o ganho de massa pelas amostras, estas tiveram suas dimensões e massas retomadas nos seguintes intervalos de tempo: 3h, 6h, 24h, 48h, 72h, 168h e 192h (oito dias), até massa constante.

Finalizadas estas medições, as amostras seguiram para câmara climática (UR  $65 \pm 2\%$  e  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) e com o objetivo de acompanhar a perda de massa, as amostras também tiveram suas dimensões e massas retomadas nos seguintes intervalos de tempo: 24h, 48h, 144h e 168h, até a massa constante.



**Figura 11.** Saturação das amostras.

Para os cálculos da retratibilidade volumétrica foi utilizada a equação 3 com base na NBR 7190/97 (ABNT, 1997).

$$R_V = ((V_{\text{sat}} - V_{\text{eq}}) / V_{\text{sat}}) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:  $R_V$  = retratibilidade volumétrica, em %;  $V_s$  = volume da lâmina saturada, em  $\text{cm}^3$ ;  $V_{\text{eq}}$  = volume na umidade de equilíbrio, em  $\text{cm}^3$ .

### 3.6. Análises químicas

Nas análises químicas foram realizados os ensaios de teor de extrativos e teor de lignina. Para tais ensaios as amostras foram transformadas em palitos e, posteriormente, convertidas em serragem por meio de um moinho de facas. Subsequente, o material moído foi subdividido em frações granulométricas por meio de um sistema de peneiras vibratórias; para estes ensaios utilizou-se a fração retida  $-40/+60 \text{ mesh}$  (Figura 12).



**Figura 12.** A) moinho de facas; B) sistema de peneiras vibratórias; C) fração retida entre as peneiras de 60 e 40 *mesh*, separadas e identificadas.

No ensaio de teor de extrativos, as análises foram realizadas em triplicata e seguiram as determinações da norma TAPPI T 204-88 (1996), em solução de etanol:tolueno (1:2). Os teores de lignina solúvel e insolúvel em ácido foram determinados de acordo com normas de procedimento de análise em laboratório LAP 003 (TEMPLETON E EHRMAN, 1996) e LAP 004 (EHRMAN, 1996) (Figura 13). As amostras livres de extrativos foram submetidas à análise somativa para determinação da lignina. Com relação ao teor de holocelulose, o mesmo foi definido como sendo a diferença entre a composição química total e a composição da fração não-carboidrato (Equação 4).

$$T_{\text{hol}} = 100 - (T_{\text{ext}} + T_{\text{ligT}}) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:  $T_{\text{hol}}$  = Teor de Holocelulose;  $T_{\text{ext}}$  = Teor de Extrativos;  $T_{\text{ligT}}$  = Teor de Lignina Total.



**Figura 13.** Andamento das Análises Químicas. A) tubo de celulose identificado; B) pesagem do material moído; C) processo de esterilização dos balões; D) extrator Soxhlet; E) balão com amostra seca; F) amostras em banho-maria – ensaio de lignina insolúvel.



### 3.7. Análise Estatística dos Resultados

A densidade, o parâmetro de rugosidade, o ângulo de contato, o parâmetro de retratibilidade e os parâmetros dos ensaios químicos foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA). Em seguida, realizou-se o teste de Tukey, a 5% de significância, que comparou as médias dos parâmetros avaliados entre as espécies. Foi realizada ainda análises de correlação linear simples separadamente para cada parâmetro. No caso dos ensaios de rugosidade e molhabilidade, também avaliou-se as médias dos parâmetros para face superior e inferior das lâminas, sem fendas e com fendas, respectivamente. Para a rugosidade, as comparações foram feitas com base no parâmetro  $R_a$  (média aritmética dos desvios do perfil da linha média, em  $\mu\text{m}$ ). Para o ensaio de molhabilidade, as comparações foram feitas por meio da diferença do ângulo final, tomado aos 10 segundos após a deposição da gota ( $\Theta_{f10}$ ), e o ângulo de contato inicial ( $\Theta_i$ ), assumindo assim que quanto maior o valor desta diferença ( $\Delta\Theta$ ), mais molhável é a espécie.

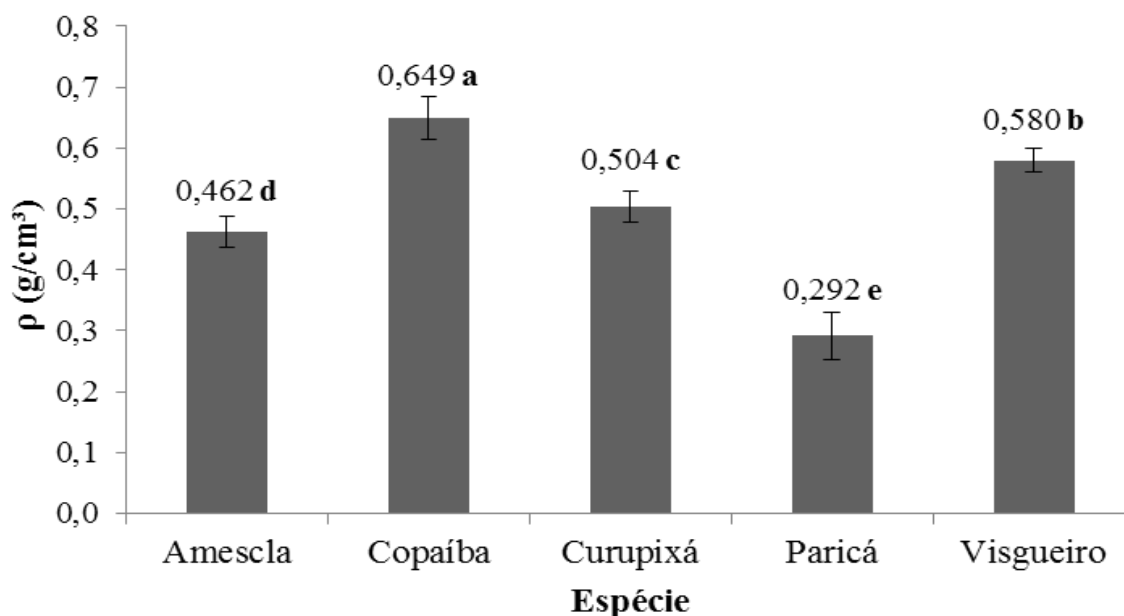
Tendo como proposta principal deste trabalho, a mistura de lâminas de diferentes espécies para a produção de painéis LVL, foi realizada uma análise multivariada a fim de agrupar as espécies de acordo com as variáveis analisadas. Para tal empregou-se a técnica multivariada de variáveis canônicas, usando-se como medida de similaridade, a distância de Mahalanobis. Esta análise foi realizada com o auxílio do software Genes (CRUZ, 1997).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Propriedades Físicas

#### 4.1.1. Densidade

Na Figura 14 podem ser observados os valores médios de massa específica aparente para as diferentes espécies estudadas.



**Figura 14.** Valores médios de massa específica aparente para as diferentes espécies estudadas.

De acordo com o Programa Nacional de Qualidade da Madeira (ABIMCI, 2009), a madeira pode ser separada em classes conforme sua densidade. Assim, Paricá e Amescla se inserem na Classe 1 ( $< 0,50 \text{ g/cm}^3$ ), Curupixá e Visgueiro na Classe 2 (entre  $0,50$  e  $0,60 \text{ g/cm}^3$ ) e a Copaíba na Classe 3 (entre  $0,61$  e  $0,7 \text{ g/cm}^3$ ).

As lâminas de copaíba apresentaram densidade menor que a faixa de  $0,7 - 0,98 \text{ g/m}^3$  citada pelo IPT (2009), assim como as lâminas de curupixá, que tiveram sua densidade abaixo da faixa de  $0,67$  a  $0,78 \text{ g/cm}^3$  (SFB, 2013). Mesma situação foi encontrada para as lâminas de paricá, com densidade abaixo da faixa  $0,40$  a  $0,63 \text{ g/cm}^3$  (PAULA; ALVES, 1997). As lâminas de amescla apresentaram densidade superior ao apresentado na literatura (SFB, 2013). Resultados similares foram observados para as lâminas de visgueiro (LOUREIRO et al., 2000). Estas pequenas variações de densidade podem ocorrer devido às variações feno e

genotípicas, como local de plantio, peso da parede celular, processo de secagem, teor de umidade, proporção de lenhos inicial e tardio, entre outros (ROWELL, 2005).

De acordo com Lutz (1978), espécies de madeira com densidade básica entre 0,40 e 0,70 g/cm<sup>3</sup> são adequadas para a produção de lâminas. Segundo Walker (1993), esta faixa é de 0,38 a 0,70 g/cm<sup>3</sup>, com preferência para aquelas com densidade próxima de 0,5 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2. Retratibilidade

A característica da madeira de inchar e retrair ocorre fundamentalmente devido a orientação das microfibrilas na camada S2 da parede secundária (TSOUMIS, 1968). O comportamento das lâminas diante desta estabilidade dimensional varia, sendo as menos densas (mais porosas) as que apresentam a maior absorção de água. Os valores médios das contrações volumétricas das lâminas são apresentados na Tabela 1. Houve diferença significativa entre as espécies avaliadas.

**Tabela 1.** Valores médios de contração das lâminas estudadas.

Espécie	R <sub>v</sub> %	
	Média	CV%
<b>Copaíba</b>	11,27 a	29,06
<b>Visgueiro</b>	6,30 b	16,15
<b>Curupixá</b>	6,28 b	16,55
<b>Amescla</b>	5,88 b	10,61
<b>Paricá</b>	4,70 b	17,24

R<sub>v</sub> = retratibilidade volumétrica; Médias seguidas da mesma letra em cada coluna não diferem entre si (Teste de Tukey a 5% de significância).

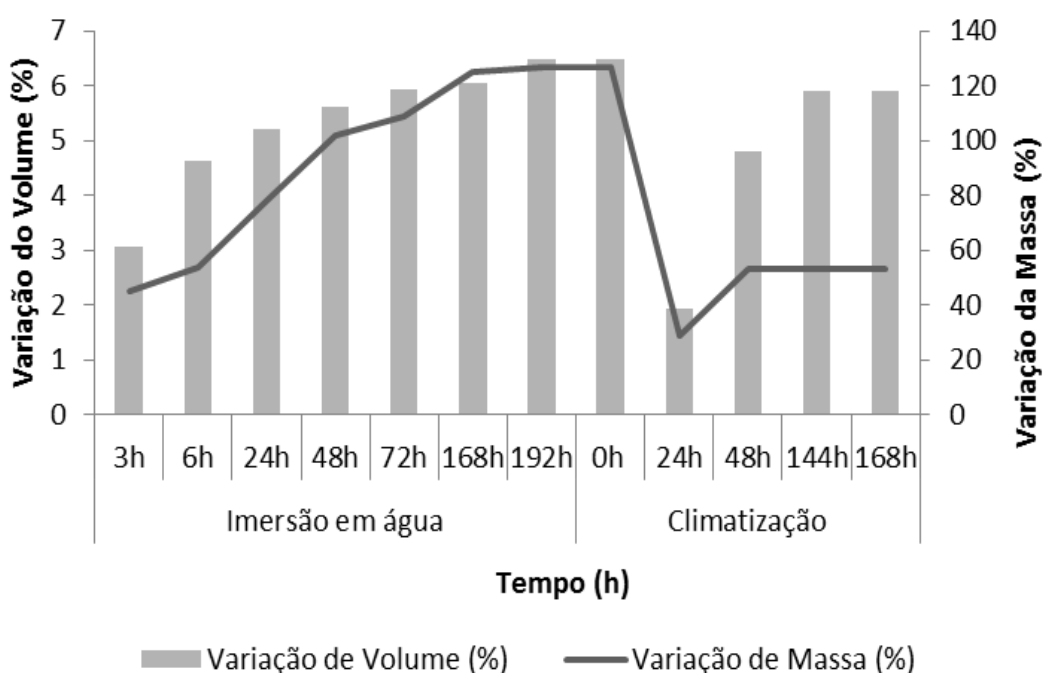
As lâminas de Copaíba apresentaram maior instabilidade dimensional, com 11,27% de contração volumétrica. As lâminas das outras quatro espécies não se diferiram estatisticamente. De acordo com Haygreen; Bowyer (1996), a contração ocorre devido a retirada de água higroscópica. Desta forma, pode-se inferir que há uma tendência desta retirada ser maior nas lâminas de Copaíba, podendo haver inclusive retirada de água higroscópica.

Bortoletto; Belini (2002) avaliaram a estabilidade dimensional de lâminas de *Schizolobium parayba* e encontraram 11,1% para a contração volumétrica; valor superior ao observado para o paricá, espécie do mesmo gênero. O valor de retratibilidade volumétrica para as lâminas de amescla foi menor que o apresentado pelo SFB (2013), 11,88%. Comportamento semelhante foi observado para as lâminas de Copaíba; a mesma instituição

encontrou valores de contração maiores para este gênero. Para as lâminas de curupixá, as porcentagens encontradas foram menores às citadas pelo SFB (2013) para *Micropholis guyanensis*, *M. mensalis* e *M. venulosa*.

Sabido que a estabilidade dimensional está intimamente relacionada à densidade, as correlações destas variáveis foram significativas somente para as lâminas de Paricá (0,760 significativa ao nível de 1%). Sendo a correlação negativa, esta vai de encontro à literatura (TSOUMIS, 1968; BURGER; RICHTER, 1991) que afirma que as madeiras menos densas são as que mais absorvem água, sendo então as que mais variam em suas dimensões.

De acordo com Del Menezzi (2006), as explicações sobre a contração da madeira, pela retirada de água higroscópica, também podem ser aplicadas no sentido inverso, ou seja, na introdução de água na madeira. Assim, tem-se o movimento inverso, chamado de inchamento. Diante disso, acompanhou-se as dimensões das lâminas durante o inchamento pela entrada de água até que toda a parede estivesse saturada (massa constante) e a perda de água em câmara de climatização até massa constante (Figura 15). Nesta figura, pode-se perceber para as lâminas de Amescla que a variação do volume acompanha a variação da massa. O ganho de massa das lâminas após 192h mergulhadas em água foi de aproximadamente 127%, enquanto que o inchamento foi de 6,5%.



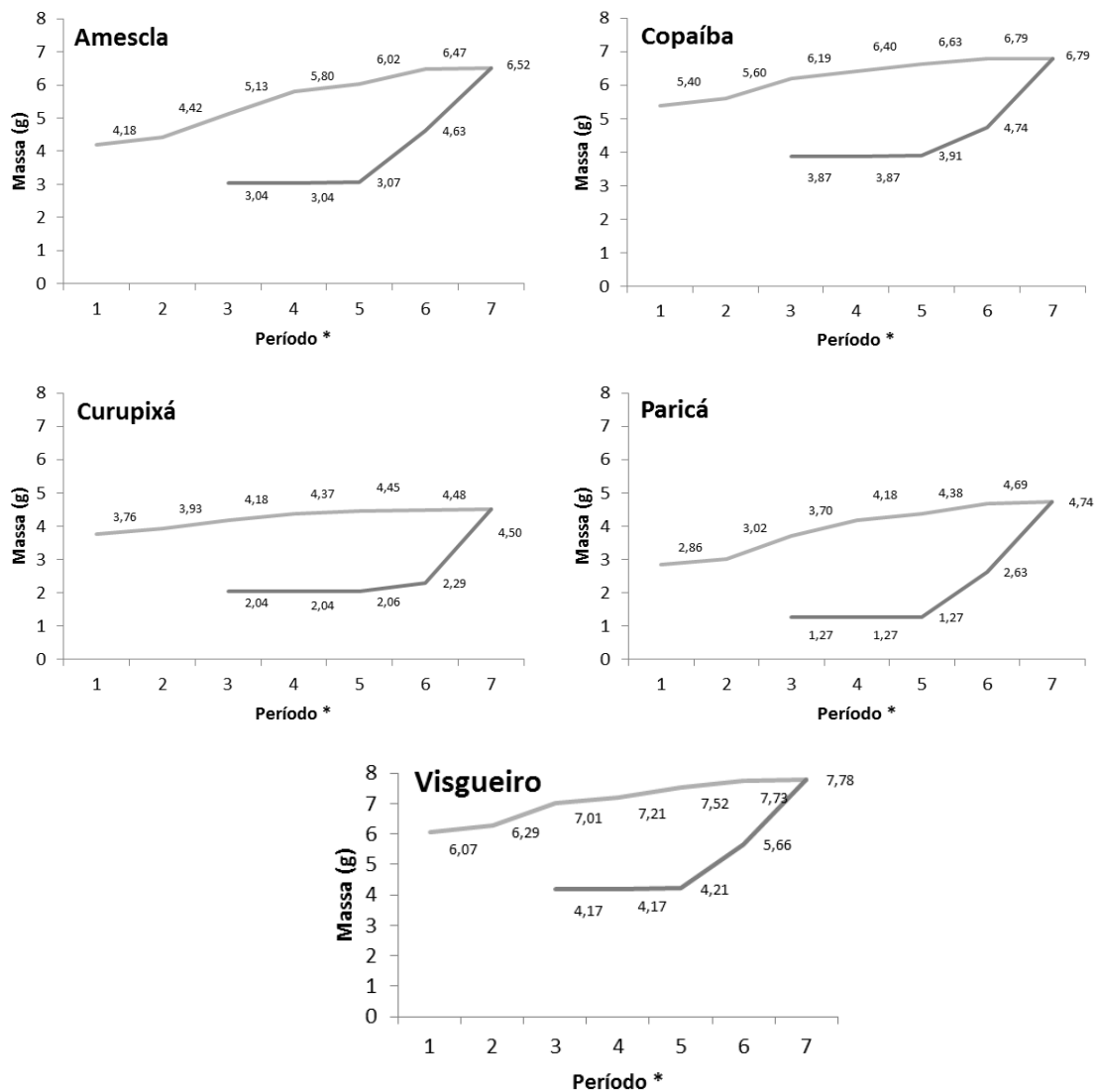
**Figura 15.** Variação do Volume e da Massa durante a imersão em água e durante permanência em câmara climática para as lâminas de Amescla.

As espécies tiveram variações distintas diante da absorção e da perda de água neste ensaio. As porcentagens encontradas para ganho de massa e volume, apresentadas na Tabela 2, demonstram quem as lâminas de Paricá (as menos densas – 0,292 g/cm<sup>3</sup>), foram as que mais absorveram água, tendo um ganho de massa de aproximadamente 287%. Entretanto, seu volume variou somente 8,89%. Isso demonstra que esta espécie apresenta muitos espaços vazios para serem ocupados pela água antes que esta passe a ocupar a parede das células. Logo em seguida, as lâminas de Amescla e Curupixá tiveram ganhos de massa aproximados, 126,64% e 123,54%, respectivamente. O que corresponde às suas densidades médias de 0,462 e 0,504 g/cm<sup>3</sup>. As espécies que menos ganharam massa foram Visgueiro e Copaíba, 88,36% e 81,36%. As lâminas de Copaíba, além de serem as mais densas (0,649 g/cm<sup>3</sup>) apresentam parte dos poros impregnado por extrativos oleosos.

**Tabela 2.** Variações de Ganho de Massa e Ganho de Volume.

<b>Ganho de Massa (%)</b>							
	<b>3h</b>	<b>6h</b>	<b>24h</b>	<b>48h</b>	<b>72h</b>	<b>168h</b>	<b>192h</b>
<b>Amescla</b>	45,21	53,50	78,29	101,61	109,01	124,93	126,64
<b>Copaíba</b>	44,19	49,77	65,42	71,08	77,21	81,48	81,63
<b>Curupixá</b>	86,67	95,09	107,65	117,11	121,14	122,55	123,54
<b>Paricá</b>	132,17	145,24	200,44	240,39	256,81	283,52	287,32
<b>Visgueiro</b>	46,62	51,84	69,49	74,37	82,06	87,12	88,36
<b>Ganho de Volume (%)</b>							
	<b>3h</b>	<b>6h</b>	<b>24h</b>	<b>48h</b>	<b>72h</b>	<b>168h</b>	<b>192h</b>
<b>Amescla</b>	3,05	4,62	5,20	5,61	5,92	6,05	6,48
<b>Copaíba</b>	7,40	9,94	10,95	11,11	11,82	12,17	14,32
<b>Curupixá</b>	5,60	6,17	6,64	7,25	7,78	8,07	8,21
<b>Paricá</b>	4,95	6,34	7,02	7,47	7,93	8,41	8,89
<b>Visgueiro</b>	3,06	7,16	8,61	9,36	9,94	10,36	10,68

Seguindo a premissa de que quando submetidas à condições ambientais distintas a madeira absorve e perde água, o caminho percorrido pelo líquido nestas duas ações é distinto gerando isotermas de sorção (Figura 16). Nota-se que as curvas não são coincidentes, sendo a curva de dessorção plotada abaixo da curva de adsorção.



**Figura 16.** Isotermas de sorção.

\*Período: 1) 3h(a); 2) 6h(a); 3) b24h(a)/168h(c); 4) 48h(a)/144h(c); 5) 72h(a)/48h(c); 6) 168h(a)/24h(c); 7) 192h(a)/0h(c).

#### 4.2. Propriedades da superfície – Rugosidade e Molhabilidade

Neste trabalho se avaliou a rugosidade em ambas as faces das lâminas das cinco espécies estudadas. Os valores encontrados para as médias dos desvios dos perfis ( $R_a$ ) da face com e sem fendas para as cinco espécies encontram-se na Tabela 3. Considerando a face sem fendas (superior) observou-se diferença estatística entre as espécies. Apresentaram maiores valores, sendo então mais rugosas em sua superfície superior, as lâminas de paricá e curupixá; enquanto que copaíba, amescla e visgueiro apresentaram valores.

**Tabela 3.** Parâmetro de rugosidade observado para as faces com e sem fendas das lâminas estudadas.

Espécie	$R_a$ SF		$R_a$ CF	
	Média	CV%	Média	CV%
<b>Amescla</b>	10,50 bB	15,31	12,45 bA	18,88
<b>Copaíba</b>	10,64 bA	26,38	11,48 bA	31,95
<b>Curupixá</b>	11,02 abB	16,53	15,05 aA	07,90
<b>Paricá</b>	12,44 aA	10,20	12,33 bA	25,12
<b>Visgueiro</b>	9,53 bA	30,85	12,31 bA	29,50

$R_a$ SF = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, sem fendas, em  $\mu\text{m}$ ;  $R_a$ CF = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, com fendas, em  $\mu\text{m}$ ; Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si (Teste de Tukey a 5% de significância);

Na análise da superfície com fendas (inferior), também houve diferença estatística. As lâminas de curupixá foram as mais rugosas enquanto que as menos rugosas foram as lâminas de amescla, paricá, visgueiro e copaíba. Todas as espécies estudadas apresentaram rugosidade maior que a encontrada por Korkut; Akgül (2007) para lâminas de Oak (*Quercus petraea* spp. *ibenca*).

Sabendo que a rugosidade interfere na uniformidade da aplicação do adesivo e na profundidade de sua penetração, Kantay et al. (2003) e Candan et al. (2010), corroborados por Piao et al. (2010), destacam que lâminas muito rugosas reduzem o contato superficial com o adesivo, resultando em uma linha de cola fraca, e conseqüentemente, em um produto engenheirado de baixa resistência. Assim, lâminas de menor rugosidade são mais desejáveis para a produção de compostos laminados.

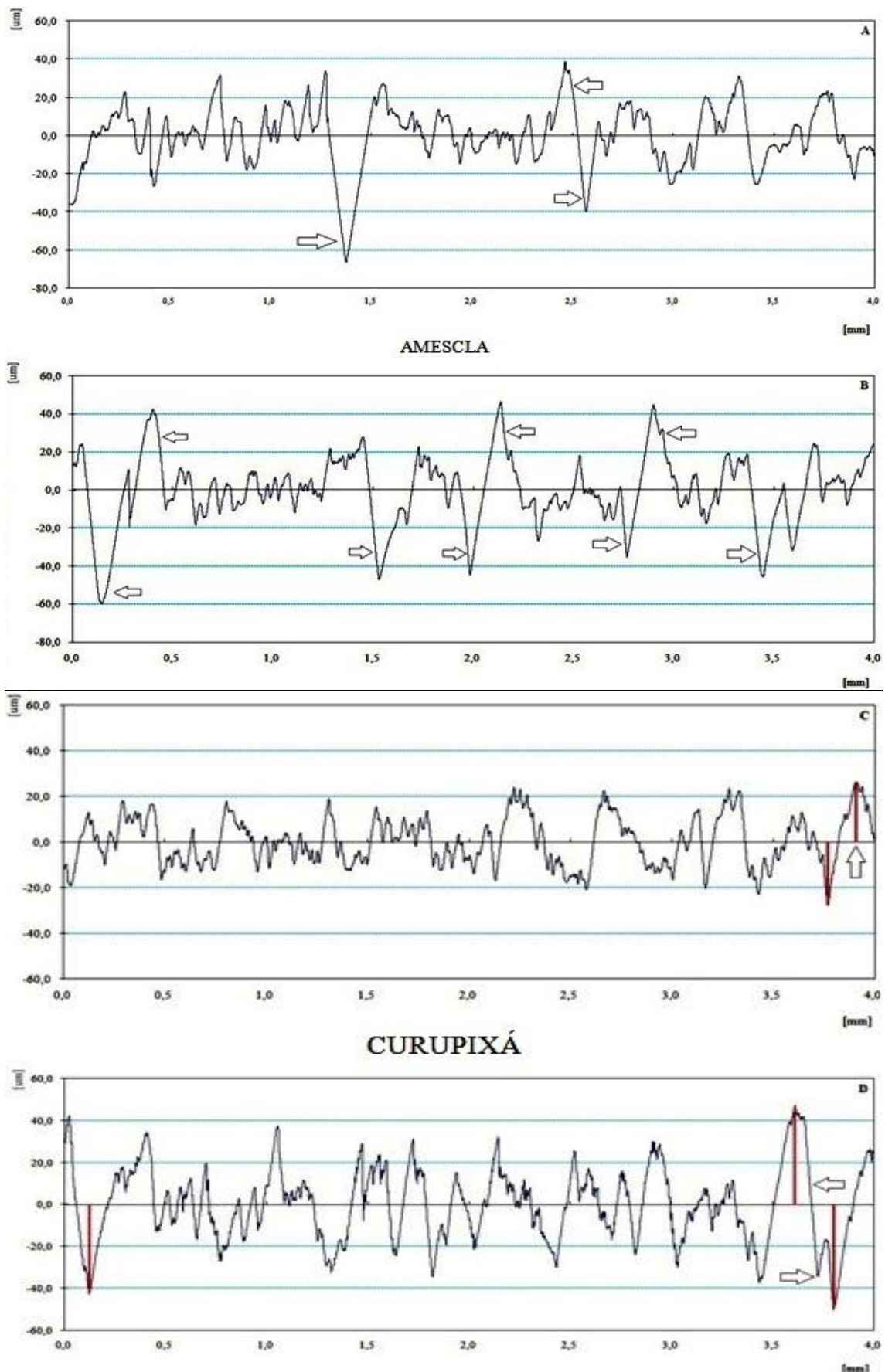
Ainda observando os dados da Tabela 3, ao se analisar a rugosidade em cada face dentro de cada espécie, foram observadas variações significativas entre a rugosidade das faces apenas para as lâminas de amescla e curupixá. Estas apresentaram o  $R_a$  da face sem fendas menor que da face com fendas. De acordo com Iwakiri (2005) este fenômeno pode ser ocasionado pela pressão exercida pela barra de compressão sobre a parte interna da lâmina. Arruda; Del Menezzi (2013) encontraram resultado semelhante trabalhando também com lâminas de Amescla, assim como Daoui et al. (2011) para lâminas de *Fagus sylvatica*. Esta variação entre as espécies citadas pode ser percebida graficamente na Figura 17. Nas lâminas de amescla a variação se dá pois na face com fendas, os picos e os vales ocorrem em maior quantidade (setas – Figura 17A e 17B), o que gera uma superfície inferior mais rugosa em comparação com a superior. Enquanto que nas lâminas de curupixá o que varia é a amplitude

dos picos e dos vales; nota-se (barras em vermelho – Figura 17C e 17D), por meio da escala lateral esquerda que os picos e vales variam de  $-30\ \mu\text{m}$  a  $+30\ \mu\text{m}$  na face superior sem fendas e de  $-60\ \mu\text{m}$  a  $+60\ \mu\text{m}$  na face inferior com fendas. Cabe ressaltar que as lâminas de curupixá possuem menor espessura diante das demais (1,58 mm); resultado do processo de laminação esta característica pode ter facilitando o fendilhamento. Daoui et al. (2011) trabalhando com lâminas de *Fagus sylvatica* de 1, 3 e 5 mm, encontraram uma rugosidade maior para as menos espessas, demonstrando assim a influência da espessura das lâminas na rugosidade.

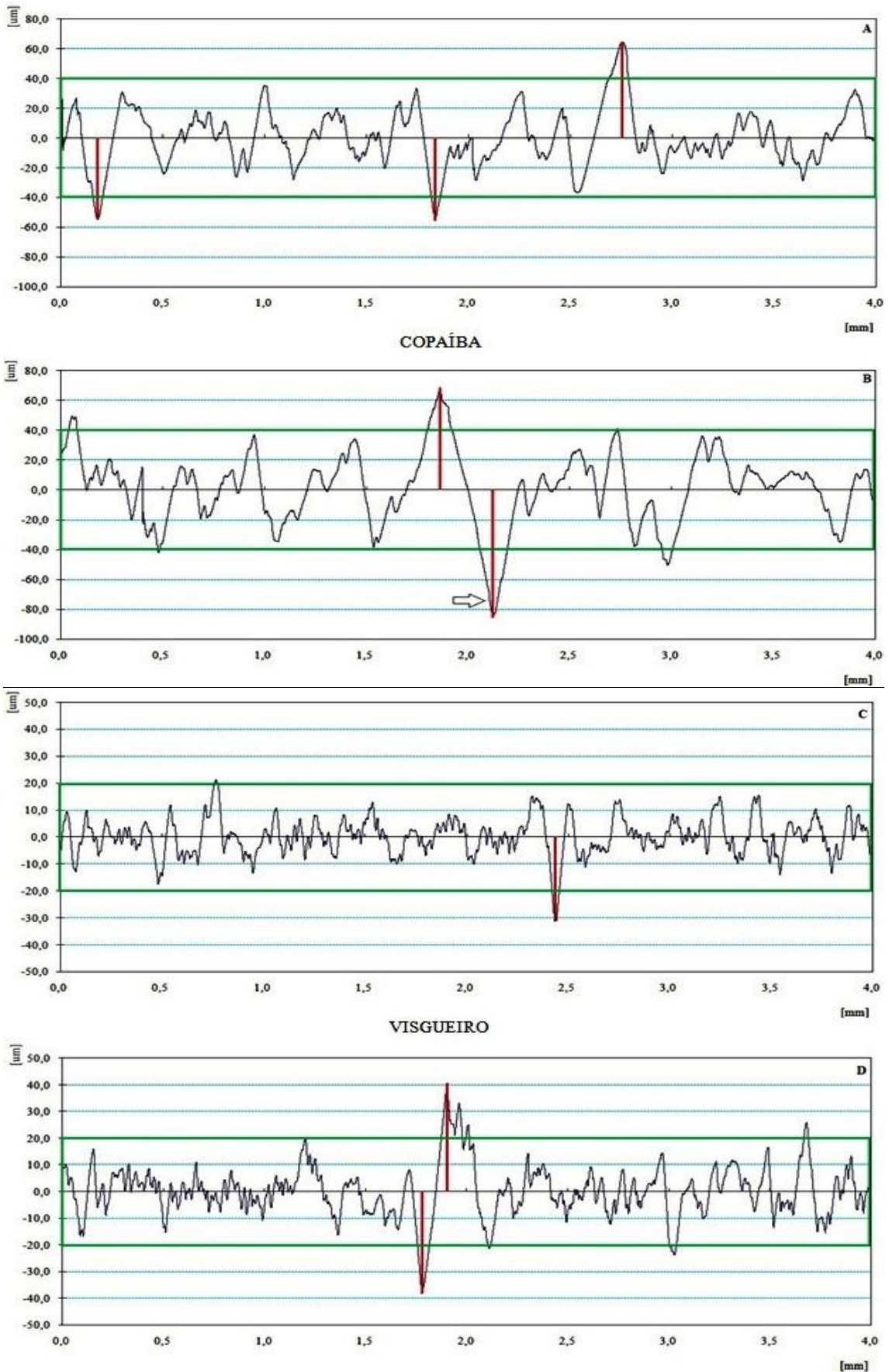
Esta variação nas faces com e sem fendas não foi observada para as lâminas de copaíba (Figura 18), paricá (Figura 19) e visgueiro (Figura 18). Estes perfis demonstraram comportamentos semelhantes em suas faces, tendo a maioria de seus picos e vales concentrados na zona neutra (retângulos verdes) e poucos de maior amplitude (barras vermelhas e seta). Este cenário demonstra que para estas espécies a pressão aplicada pela barra de compressão foi maior minimizando o efeito do fendilhamento.

Oposto aos resultados encontrados para as lâminas de paricá, Melo et al. (2013), trabalhando com lâminas da mesma espécie encontrou diferenças significativas na rugosidade das faces de suas lâminas. Na figura 19, nota-se que grande parte dos picos e vales, em ambas as faces, se concentram próximos à zona neutra do perfil (retângulos verdes), apresentando poucos picos e vales mais profundos (setas e barras vermelhas). Considerando que neste trabalho, utilizaram-se lâminas provenientes da mesma indústria que o trabalho supracitado, pode-se inferir que isto pode ser causado pela não uniformidade no processamento das lâminas, pelas irregularidades anatômicas ou por variações nos locais de medição (GURAU et al., 2007; GURAU, 2005).

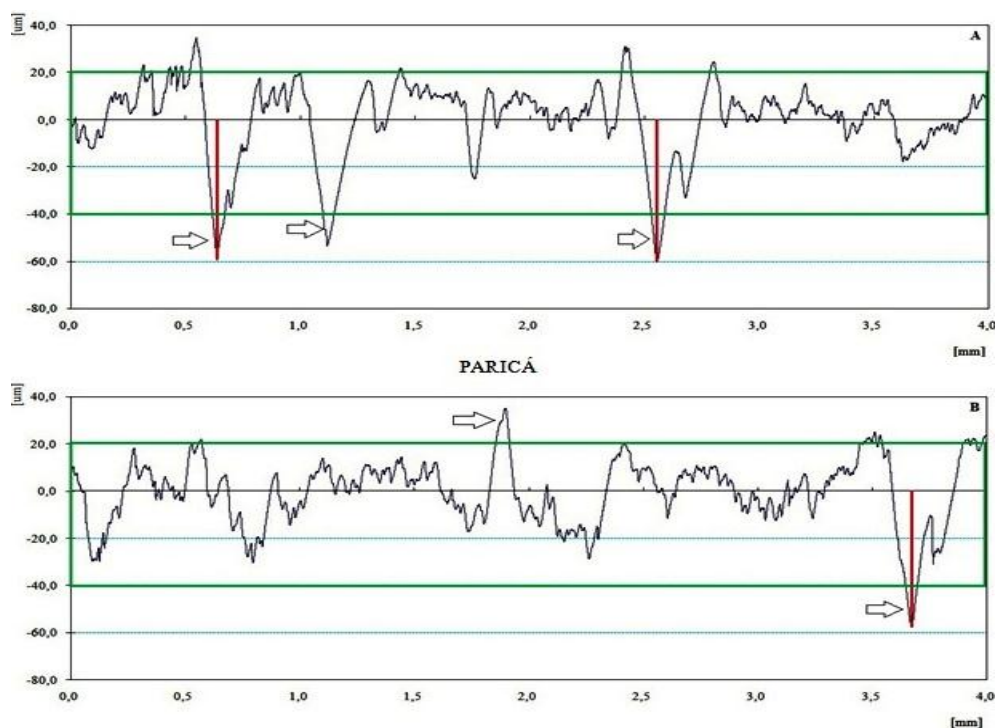




**Figura 17.** Perfis típicos de rugosidade observados para as faces sem fendas (A e C) e com fendas (B e D); amescla e curupixá, respectivamente.



**Figura 18.** Perfis típicos de rugosidade observados para as faces sem fendas (A e C) e com fendas (B e D); copaíba e visgueiro, respectivamente.



**Figura 19.** Perfil típico de rugosidade observado para as faces sem fendas (a) e com fendas (b) das lâminas de paricá.

A rugosidade é influenciada pela grã e pelas características anatômicas da madeira, pela largura dos anéis de crescimento, raios, nós, lenho de reação e tipo de processamento utilizado na produção das lâminas (TAYLOR et al., 1999; GURAU, 2005). Buscando entender melhor esse parâmetro, sua correlação com a densidade aparente das lâminas é apresentada na Tabela 16 (anexos). Entretanto não foram encontradas correlações significativas.

Considerando que a rugosidade das lâminas não pode ser considerada limitante para a avaliação da superfície das lâminas, adicionalmente avaliou-se a molhabilidade do material. O líquido utilizado para tal análise foi a água destilada. O ângulo final foi tomado aos 10 segundos devido às lâminas de paricá; a água se espalhava e penetrava com tal rapidez que se a análise perdurasse por mais tempo, o erro associado à medição influenciaria diretamente os resultados. Desta forma, a diferença calculada para ambas as faces das lâminas, demonstra a variação do ângulo de contato final em relação ao ângulo de contato inicial (Tabela 4). Quanto maior a diferença, sinônimo de que muita água penetrou na lâmina.

**Tabela 4.** Valores médios da diferença do ângulo de contato após 10 segundos e o ângulo de contato inicial observados para as diferentes faces das lâminas.

Espécie	$\Delta\Theta_{SF}^{\circ}$		$\Delta\Theta_{CF}^{\circ}$	
	Média	CV%	Média	CV%
<b>Amescla</b>	36,00 bA	43,03	32,49 bA	21,76
<b>Copaíba</b>	40,55 bA	32,20	44,29 abA	08,41
<b>Curupixá</b>	08,99 cA	85,04	11,02 cA	43,51
<b>Paricá</b>	38,02 bA	45,62	40,37 abA	40,05
<b>Visgueiro</b>	59,58 aA	38,39	49,29 aA	45,63

$\Delta\Theta_{SF}$  = diferença do ângulo de contato inicial e final, após 10 segundos sem fendas °;  $\Delta\Theta_{CF}$  = diferença do ângulo de contato inicial e final, após 10 segundos com fendas °; Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si (Teste de Tukey a 5% de significância);

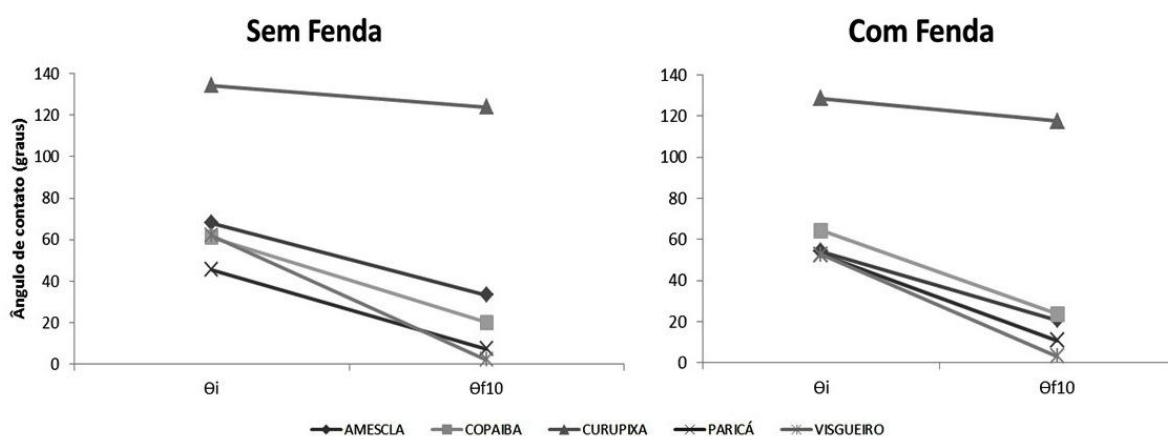
Observa-se que para nenhuma das espécies houve diferença significativa na molhabilidade das faces estudadas. Isto demonstra que o fendilhamento na parte inferior das lâminas não interferiu na penetração da água nas lâminas. Já Arruda; Del Menezzi (2013) ao avaliarem a molhabilidade das faces de lâminas de amescla observaram que a face com fendas foi mais molhável que a face sem fendas.

Os elevados coeficientes de variação observados podem ser justificados pela própria medição, já que qualquer alteração de temperatura, vento e/ou tremor interferem substancialmente na leitura do ângulo. Outro provável motivo, destacado por Shi; Gardner (2001) é que a direção da grã influencia a molhabilidade da madeira. Desta forma, dependendo da forma como a tora foi laminada, as lâminas podem ter seus elementos anatômicos mais ou menos expostos na superfície, o que facilita ou não a permeabilidade do líquido. As lâminas de amescla apresentaram fendilhamento praticamente imperceptível e uma grã peculiarmente irregular, o que pode ter originado os resultados confrontantes.

Observando ainda os dados apresentados na Tabela 4, nota-se que para a superfície superior (sem fendas), as lâminas foram diferenciadas, de acordo com a sua molhabilidade. As lâminas de visgueiro foram as mais molháveis. As lâminas com molhabilidade intermediária foram copaíba, paricá e amescla. As lâminas de curupixá foram as mais hidrofóbicas. Comportamento semelhante foi notado ao se analisar a superfície inferior, com fendas.

Os desempenhos da penetração e do espalhamento da gota sobre as superfícies das lâminas estão evidenciados na Figura 20. Uma superfície pode ser considerada hidrofóbica quando seu ângulo de contato for maior que 90° e hidrofílica quando for menor que 90° (LI et

al., 2007; PIAO et al., 2010). As lâminas de curupixá apresentaram valores médios de ângulo de contato ao final de 10 segundos de 124° e 118°, sem e com fendas, respectivamente, sendo então consideradas hidrofóbicas. De acordo com Costa (2006), madeiras do gênero *Micropholis* apresentam aspectos, como elementos de vaso e pontoações intervasculares de diâmetro pequeno e tiloses, que obstruem a movimentação de líquidos no interior dos elementos de vaso. Conforme relatado por Ahmed; Chun (2011), as pontoações provêm caminhos de circulação do líquido entre as células da madeira, e sua presença, tamanho e distribuição afetam a penetração e o espalhamento do líquido.



**Figura 20.** Variação dos ângulos de contato médios finais ( $\Theta_{f10}$ ) e iniciais ( $\Theta_i$ ), sem e com fendas. ( $\Theta_i$  = ângulo de contato medido no momento da deposição da gota;  $\Theta_{f10}$  = ângulo de contato medido 10 segundos após a deposição da gota).

As médias dos ângulos de contato após 10 segundos das outras quatro espécies estudadas foram menores que 90°, sendo estas então classificadas como hidrofílicas. As espécies e seus valores em ordem crescente de molhabilidade são: amescla (33°; 21°, sem e com fendas), copaíba (20°; 24°), paricá (7°; 11°) e visgueiro (2°; 3°). Diante destes resultados as lâminas de visgueiro foram as mais hidrofílicas, seguidas das lâminas de paricá. Loureiro et al. (2000) destacam que esta espécie demonstra alta permeabilidade. Estes mesmos autores, ao descreverem a anatomia desta espécie afirmam que seus elementos (parênquima, poros e linhas vasculares) são visíveis a olho nu, demonstrando que estes conferem tamanho suficiente para uma melhor circulação de líquidos.

Amorim et al. (2013), estudando a molhabilidade de madeiras tropicais, medindo o ângulo de contato após 120 segundos, encontraram valores menores para *T. burserifolia*: 17° e 20° nas faces radial e tangencial, respectivamente. Estudando outra espécie, Melo et al. (2013) avaliou lâminas de paricá e concluíram que após 30 segundos, a gota penetra

completamente, o que corrobora o resultado encontrado no presente trabalho de que as lâminas de paricá são consideravelmente hidrofílicas.

As características do líquido utilizado para tais análises influenciam diretamente nos resultados. Cruz (2006) e Brisolari (2008), reiterados por Melo (2012), afirmam que quanto menor a viscosidade do líquido mais rapidamente ocorrerá sua penetração na madeira. A viscosidade da água é 1,002 cP, menor que a adesivos poliméricos, o que demonstra sua baixa resistência ao escoamento.

Relembrando que a molhabilidade é influenciada pela rugosidade, na Tabela 17 (anexos), se encontram as correlações da face superior, sem fendas, destas duas características. Os resultados encontrados demonstram que no caso das lâminas estudadas não existe correlações significativas para as variáveis analisadas. Desta forma, a rugosidade da superfície das lâminas não interferiu na capacidade da gota de água em se espalhar e penetrar neste material. Existem outros fatores que influenciam este comportamento, como o teor de extrativos presentes na madeira (GARDNER et al., 1991). Segundo Tsoumis (1968), madeiras com menos extrativos “seguram” mais o líquido em suas células.

### **4.3. Composição Química**

Os resultados obtidos por meio das análises químicas podem ser observados na Tabela 5. Os extrativos das madeiras tropicais brasileiras são muito diversificados, tanto em quantidade como na natureza química (BARRETO; PASTORE, 2009) e podem compor até 20% do peso da madeira seca (OLIVEIRA et al., 2012). Os resultados encontrados diferem estatisticamente entre si; estes variam de 2,44% a 4,08%, demonstrando que as espécies estudadas apresentam teores relativamente baixos em se tratando de madeiras tropicais (PAES et al., 2009).

O valor encontrado para as lâminas de paricá, 4,08% foi menor que o encontrado por Melo et al. (2013), 5,3%. Enquanto que as lâminas de amescla, classificadas no grupo c, apresentaram teor de extrativos 2,44%, resultado próximo, porém maior ao encontrado por Santana; Okino (2007) 1,6%. Estes mesmos autores encontraram 3,1% de teor de extrativos para a espécie *Parkia multijuga*, mesmo gênero do visgueiro, que apresentou 3,15%. Apesar da extensa literatura que trata da caracterização química do óleo de copaíba (TILLOTSON, 1945; VEIGA JUNIOR; PINTO, 2002; PIERI et al., 2009, entre outros),

poucos são os artigos onde é encontrada a identificação botânica da planta e a caracterização química da madeira.

**Tabela 5.** Percentuais dos constituintes químicos observados para as espécies estudadas.

Espécie	ET (%)		LigT (%)		Holo (%)	
	Média	CV%	Média	CV%	Média	CV%
<b>Amescla</b>	2,44 c	5,93	28,69 a	0,92	68,87 b	0,19
<b>Copaíba</b>	2,87 bc	1,98	24,95 b	0,15	72,19 a	0,06
<b>Curupixá</b>	2,85 bc	13,00	25,60 b	0,08	71,59 a	0,51
<b>Paricá</b>	4,08 a	3,19	27,71 a	2,66	68,21 b	0,89
<b>Visgueiro</b>	3,15 b	6,61	29,01 a	3,22	67,84 b	1,55

ET = Extrativos Totais (%); LigT = Lignina Total (%); Holo = Holocelulose (%) – dados contabilizando cinzas; Médias seguidas da mesma letra em cada coluna não diferem entre si (Teste de Tukey a 5% de significância).

Outro componente da madeira, a lignina (presente de 18% a 35% na madeira), é um polímero amorfo altamente complexo. Fica localizada na parede celular secundária e na lamela média (ROWELL, 2005) e influencia diretamente a estabilidade dimensional deste material porque ocupa espaços na parede celular que seriam ocupados por água (ou adesivos). Das espécies analisadas, o visgueiro apresentou maior porcentagem de lignina, 29% e a copaíba a menor, 25%. Os teores de lignina estão próximos aos encontrados por outros estudos com madeiras tropicais; Queiroz (2001) estudando *Astronium graveolens* encontrou 28% de lignina, Balloni (2009) estudando *Pinus elliotti* encontrou 28%. Resultados estes corroborado pelo estudo de Santana; Okino (2007) onde os teores de lignina para madeiras tropicais variam de 26,7%, para *Trattinnickia rhoifolia*, e 37% para *Sextonia rubra*.

Finalizando a caracterização química das lâminas, tem-se o teor de holocelulose. A holocelulose é a combinação de celulose e hemicelulose e, corresponde por 65-70% do peso seco da madeira. São polímeros ricos em grupos hidroxilas, responsáveis pela absorção de umidade por meio de ligações de hidrogênio (ROWELL, 2005). Este componente químico está mais presente nas lâminas de copaíba (72%) e menos presente nas lâminas de visgueiro (68%). Trugilho et al. (1996) estudando a madeira de *Eucalyptus saligna* concluíram que a porcentagem deste constituinte aumenta com a idade, sendo 68,5% para madeiras serradas aos 12 meses e 72,5% para as serradas com 48 meses.

#### 4.4. Agrupamento das lâminas por meio das variáveis canônicas

A utilização das variáveis canônicas teve por finalidade proporcionar uma simplificação estrutural dos dados, de modo que a colagem das lâminas, influenciada, em

princípio, por um conjunto p-dimensional (p = números de características consideradas no estudo), fosse avaliada por um complexo bi ou tridimensional de fácil interpretação geométrica. Foram realizadas análises de correlação canônica para verificar as associações existentes entre a rugosidade em ambas as faces, a molhabilidade também em ambas as faces, a densidade e a retratibilidade volumétrica. Já o teor de extrativos não entrou nesta análise devido ao seu baixo número de repetições. Na Tabela 6, são apresentadas as estimativas dos autovalores, e percentagens das variâncias acumuladas e os autovetores (coeficientes de ponderação) associadas a cada uma das variáveis canônicas estimadas, obtidos a partir da matriz de correlação entre as características em estudo.

De acordo com Tabachnick; Fidell (2007) e Martins et al. (2002), considera-se que o número adequado de variáveis canônicas para expressar a variação nos dados originais deve ser tal que a variância acumulada seja superior a 80%.

**Tabela 6.** Autovalores, variância acumulada e coeficientes de ponderação das características envolvidas.

VC	Autovalor ( $\lambda_1$ )	Autovalor (%)	VA	$R_aSF$	$R_aCF$	$\Delta\theta SF$	$\Delta\theta CF$	$\rho$	$R_V$
VC1	4,25	58,18	58,18	-0,15	-0,13	0,58	0,58	0,37	0,39
VC2	2,61	35,76	<b>93,94</b>	0,06	0,02	-0,37	-0,38	0,70	0,48
VC3	0,42	5,78	99,72	0,58	-0,19	-0,28	0,27	-0,42	0,55
VC4	0,02	0,28	100,00	-0,28	-0,37	0,40	-0,60	-0,35	0,39

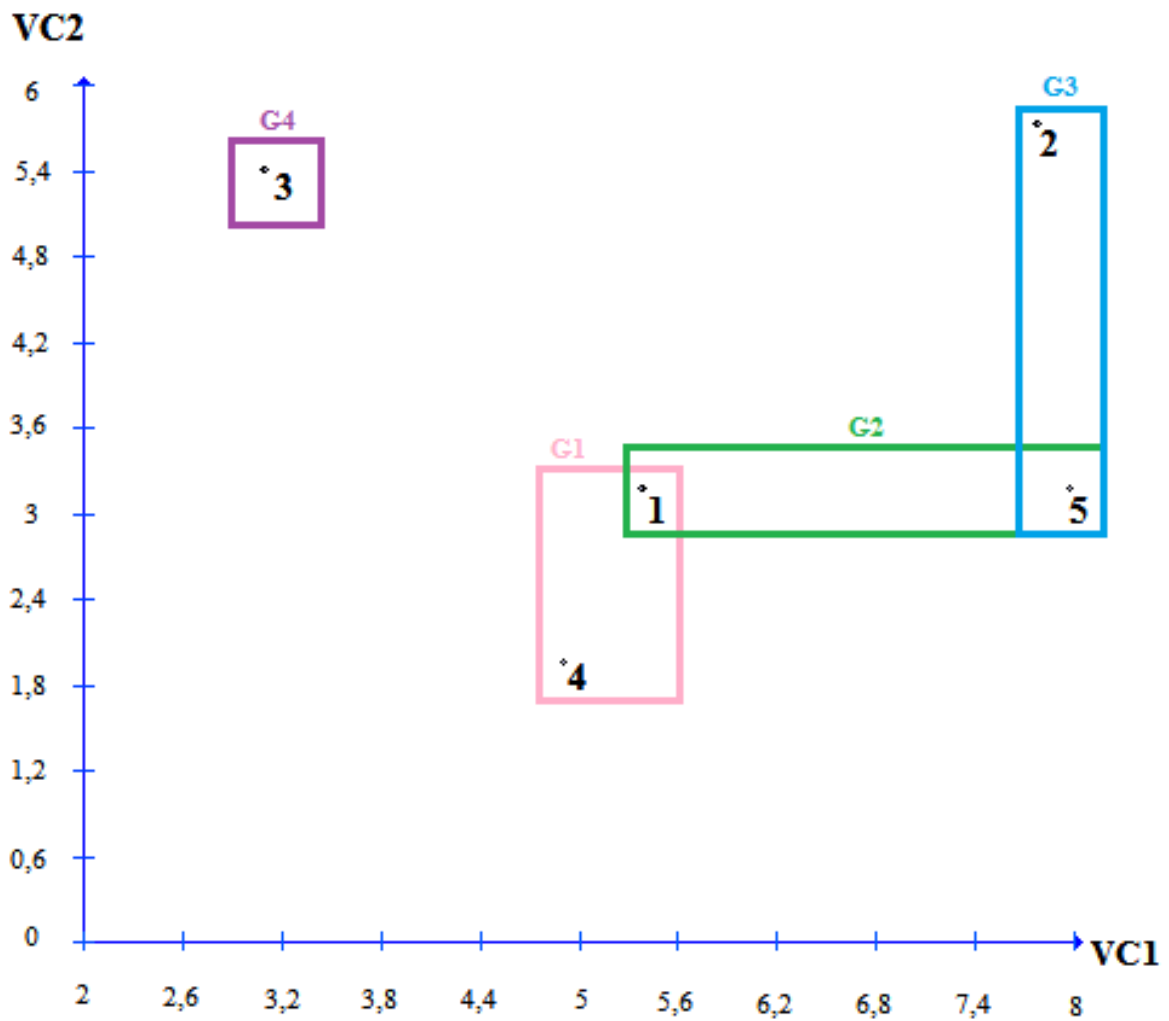
VC = variável canônica; VA = variância acumulada;  $R_aSF$  = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, sem fendas ( $\mu m$ );  $R_aCF$  = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, com fendas ( $\mu m$ );  $\Delta\theta SF$  = diferença do ângulo de contato inicial e final, após 10 segundos, da superfície superior, sem fendas °;  $\Delta\theta CF$  = diferença do ângulo de contato inicial e final, após 10 segundos, da superfície inferior, com fendas °;  $\rho$  = densidade aparente ( $g/cm^3$ );  $R_V$  = retratibilidade volumétrica (%).

Verifica-se então que as duas primeiras variáveis canônicas explicam aproximadamente 94% da variação total, sendo, portanto, suficientes para determinar as combinações. Para tanto foi realizada uma análise bidimensional (Figura 21) onde é apresentada a dispersão gráfica das cinco espécies, com base nos escores das duas primeiras variáveis canônicas. Para que houvesse o estabelecimento dos grupos, na análise de variáveis canônicas consideraram-se seis características das lâminas ( $R_aSF$ ;  $R_aCF$ ;  $\Delta\theta SF$ ;  $\Delta\theta CF$ ;  $\rho$ ;  $R_V$ ). Dentre essas seis, a análise revelou que a ordem decrescente de magnitude destes autovetores foi:  $\Delta\theta SF - \rho - R_V - \Delta\theta CF - R_aCF - R_aSF$ .



Visualmente, constata-se que a espécie 3, curupixá, se distanciou das demais, constituindo um grupo unitário característico (G3 - roxo), demonstrando que as variáveis avaliadas desta espécie se comportam de forma diferente quando comparada as outras. Em seguida, foram formados 3 grupos de acordo com o grau de similaridade das espécies (circulados em rosa, verde, azul e roxo). O grupo 1 (G1 - rosa) é composto por amescla x paricá e o grupo 3 (G3 – azul) por copaíba x visgueiro; mesmo distantes no eixo “y”, as espécies encontram-se próximas a um mesmo valor dentro da variável canônica 1 (eixo “x”), que é responsável por 58,18% desta distribuição. Situação inversa ocorre no grupo 2 (G2 – verde), composto por amescla x visgueiro; este grupo encontra-se alinhado ao mesmo valor dentro da variável canônica 2 (eixo “y”), que é responsável por aproximadamente 35,76% desta distribuição.

Diante dessa conformação, supõe-se que o G3 deverá proporcionar melhores resultados nas propriedades do painel porque este foi estabelecido pela VC1, que apresenta maior peso na variação total que a VC2.



**Figura 21.** Dispersão dos escores das cinco espécies em relação às duas primeiras variáveis canônicas (VC1 e VC2), tendo como base seis características. (1 – Amescla; 2 – Copaíba; 3 – Curupixá; 4 – Paricá; 5 – Visgueiro)

## 5. CONCLUSÕES

- A análise de variáveis canônicas gerou quatro grupos distintos recomendados para a colagem e a produção de painéis LVLs, sendo a molhabilidade na face sem fendas e a densidade os fatores de maior importância nesta conformação;
- As lâminas de curupixá formaram um grupo isolado, não sendo indicada para o uso em conjunto com as outras espécies;
- Três grupos foram definidos para a produção dos LVLs a partir da mistura de lâminas amazônicas: 1) amescla x paricá; 2) amescla x visgueiro; 3) copaíba x visgueiro.

## CAPÍTULO 2

---

### PROPRIEDADES DE PAINÉIS LVLs PRODUZIDOS A PARTIR DO AGRUPAMENTO DE LÂMINAS DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS

#### 1. INTRODUÇÃO

Os painéis de lâminas paralelas (LVL – *Laminated Veneer Lumber*) são painéis estruturais confeccionados a partir de lâminas de madeira coladas na mesma direção de suas fibras. O desenvolvimento tecnológico desse produto engenheirado de madeira, permite aumentar os vãos para um maior aproveitamento do espaço interno, e tem uma concepção de ser alternativo à madeira sólida (AYDIN et al., 2004).

No mercado exterior, estes painéis apresentam grande aceitação sendo utilizados para fins estruturais (doméstico e industrial) e mobílias (OZARSKA, 1999). Ainda de acordo com este autor existem muitas pesquisas concentradas nos Estados Unidos, Japão, Malásia e China, contudo os estudos envolvem em sua maioria espécies de densidade variando entre 0,29 a 0,70 g/cm<sup>3</sup>. No Brasil ainda não existe fabricação em nível industrial; somente pesquisas em escala laboratorial. Tais pesquisas buscam a adequação da matéria-prima oriunda de reflorestamento, e poucos estudos avaliam a viabilidade técnica a partir de madeiras amazônicas.

As propriedades de resistência e rigidez do painel são indicadoras de qualidade do produto final, e sendo assim devem ser conhecidas. Neste sentido, a avaliação não destrutiva é uma técnica que permite a identificação das propriedades de certo material sem que se altere sua capacidade de uso futuro. As informações obtidas direcionam as aplicações apropriadas do material avaliado (ROSS et al., 1998). Esta técnica tem como vantagens além da possível utilização posterior da peça testada, a rapidez de aplicação do método, a redução de perda do material e a classificação de peças em classes de qualidade e resistência (SHIMOYAMA; MATOS, 2005).

Desta forma, diante do advento tecnológico dos adesivos estruturais e dos métodos não destrutivos, o objetivo do segundo capítulo dessa dissertação é avaliar a viabilidade técnica da produção de painéis LVL misturando-se lâminas de madeiras amazônicas, organizadas por uma análise de variáveis canônicas do capítulo anterior.

## **2. HIPÓTESE**

O agrupamento das espécies sugerido pela análise de variáveis canônicas (Capítulo 1) reflete nas propriedades dos painéis confeccionados.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando a disponibilidade de material, sua espessura e a relação vão/espessura do painel, estabelecida em norma para os ensaios de flexão estática, foram utilizadas 9 lâminas na confecção de cada painel.

Destacando as atividades realizadas no Capítulo 1 desta dissertação, a definição de cada tratamento ocorreu de acordo com a classificação estabelecida pela análise de variáveis canônicas. Foi adotada a espécie mais densa nas faces (3 lâminas na face superior e 3 lâminas na face inferior) e a espécie menos densa no miolo (3 lâminas) (Tabela 7).

**Tabela 7.** Delineamento Experimental e confecção dos painéis.

<b>T</b>	<b>Grupo</b>	<b>Design dos painéis</b>	<b>Descrição</b>
<b>T1</b>	G1	3A 3Pa 3A	3 lâminas de Amescla nas bordas e 3 de Paricá no miolo
<b>T2</b>	G2	3Pk 3A 3Pk	3 lâminas de Visgueiro nas bordas e 3 de Amescla no miolo
<b>T3</b>	G3	3Co 3Pk 3Co	3 lâminas de Copaíba nas bordas e 3 de Visgueiro no miolo
<b>T4</b>	G1 e G2	9A	9 lâminas de Amescla
<b>T5</b>	G2 e G3	9Co	9 lâminas de Copaíba
<b>T6</b>	G4	9Cu	9 lâminas de Curupixá
<b>T7</b>	G1	9Pa	9 lâminas de Paricá
<b>T8</b>	G2	9Pk	9 lâminas de Visgueiro

Antes da confecção dos painéis, todas as lâminas foram avaliadas de forma não-destrutiva com o auxílio de equipamento *Stress Wave Timer* (modelo 239A - marca Metriguard). Esta avaliação teve como objetivo determinar a velocidade de propagação das ondas de tensão através das lâminas ( $SW_L$ ) para posteriormente comparar estes resultados aos da avaliação não-destrutiva realizada nos painéis prontos.

#### 3.1. Confecção dos Painéis LVL

Após climatização até massa constante ( $65 \pm 2\%$  UR;  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ), as lâminas de amescla, copaíba, paricá e visgueiro foram seccionadas em seções de 16 cm x 50 cm ( $l \times c$ ) e as lâminas de curupixá em 13 cm x 47 cm ( $l \times c$ ). A montagem de cada painel foi feita aleatoriamente (sem a classificação das lâminas).

Foi utilizado o adesivo PVA “crosslinking” MultiBond® X-080 (Franklin Adhesives & Polymers – Tabela 8), composto por uma emulsão de acetato de polivinila bicomponente, que quando utilizado com o catalisador TSA, atinge alto nível de resistência a água. A preparação do adesivo foi feita pela mistura de seus componentes, utilizando-se 6% de catalisador (por peso), mexendo a composição vigorosamente com uma espátula a fim de que o catalisador não permanecesse no fundo do recipiente.

**Tabela 8.** Propriedades físicas do adesivo PVAc.

<b>Aparência</b>	Líquido de cor branca
<b>Densidade</b>	1,10 kg/l
<b>Sólidos (%)</b>	51 – 54
<b>pH</b>	4 – 5,1
<b>Viscosidade típica (cPs)</b>	Não Catalisado – 4.500 / Catalisado – 3.500

Fonte: Boletim Técnico – Franklin Adhesives & Polymers.

Após a preparação do adesivo (Figura 22A), este foi espalhado sobre uma face das lâminas, com o auxílio de uma espátula, obedecendo a gramatura de 150 g/m<sup>2</sup>, indicada pelo fabricante. Após montados, os painéis foram então submetidos a um processo de pré-prensagem com pesos de cimento durante 5 minutos. Posteriormente, foi realizada a prensagem a quente à 104°C e 1,0 MPa de pressão específica (Figura 22B). O tempo da prensagem variou de acordo com as recomendações do fabricante quanto à espessura final do painel; desta forma, T1, T2, T3, T4, T5 e T8 foram prensados por 9 minutos enquanto que T6 e T7 por 5 minutos.



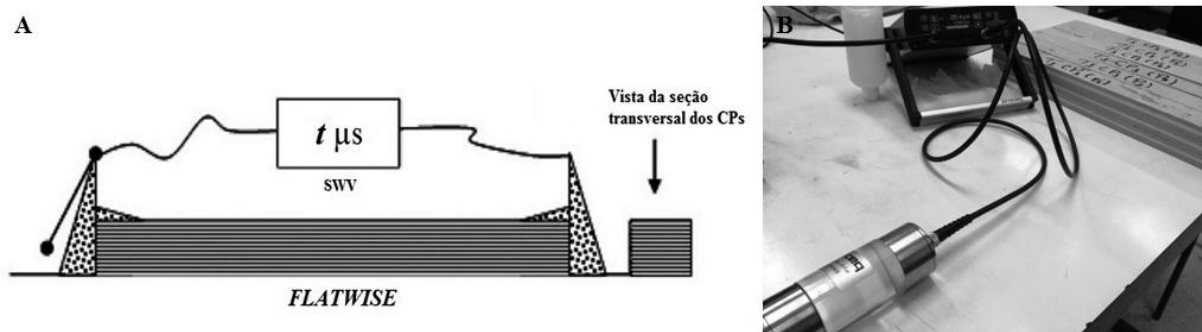
**Figura 22.** Confeccção dos painéis. A) Lâminas e adesivo utilizados; B) Acompanhamento da temperatura durante a prensagem dos painéis.

Depois de prontos, os painéis foram alocados em câmara climática até massa constante. Por fim, foram esquadrejados e confeccionados 84 CPs para o ensaio de densidade,

avaliação não destrutiva e resistência a flexão estática. Posterior a esses ensaios, dos topos destes mesmos CPs, foram retirados 48 CPs para ensaio de compressão paralela, 48 CPs para ensaio de cisalhamento na linha de cola e 48 CPs para os ensaios de inchamento em espessura, absorção de água e taxa de não-retorno em espessura.

### 3.2. Avaliação não-destrutiva (AND)

Neste estudo, foram utilizados dois equipamentos para a avaliação não destrutiva: o *Stress Wave Timer* (modelo 239A - marca Metriguard – Figura 23A) e o Ultrassom (frequência 54 kHz – marca Pundit Lab – Figura 23B). Ambos com o objetivo de determinar a velocidade de propagação das ondas de tensão longitudinalmente e em uma só posição, *flatwise*.



**Figura 23.** A) Exemplo esquemático da determinação do tempo de trânsito da onda de tensão gerada pelo equipamento Stress Wave na posição *flatwise* (Fonte: adaptado de SOUZA et al., 2008); B) Ultrassom em processo de calibragem no laboratório.

O primeiro equipamento (*stress wave timer*) possui um pêndulo de impacto que gera uma onda de tensão, a qual se propaga através do CP; dois acelerômetros, conectados ao CP medem o tempo de trânsito desta onda ( $t$ ,  $\mu\text{s}$ ). Este valor foi utilizado para determinar a velocidade de propagação da onda ( $SW_P$ , m/s) e posteriormente o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dsw}$ , N/mm<sup>2</sup>), de acordo com as equações 5 e 6. O segundo equipamento possui dois transdutores circulares que acoplados ao CP com o auxílio de gel medicinal, determinou o tempo de trânsito da onda ultrassônica ( $t$ ,  $\mu\text{s}$ ). Este tempo foi utilizado para se calcular a velocidade de propagação da onda ( $V_{LL}$ , m/s) e o coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ , N/mm<sup>2</sup>), de acordo com as equações 5 e 7.



$$SW_P = V_{LL} = L / (t \times 10^{-6}) \quad (\text{Equação 5})$$

$$E_{dswp} = (SW_V^2 \times \rho) / g \times 10^{-5} \quad (\text{Equação 6})$$

$$C_{LL} = V_{LL}^2 \times \rho \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:  $SW_V$  = velocidade de propagação da onda do *stress wave* (m/s);  $V_{LL}$  = velocidade de propagação da onda do ultrassom (m/s);  $E_{dsw}$  = módulo de elasticidade dinâmico (N/mm<sup>2</sup>);  $C_{LL}$  = coeficiente de rigidez (N/mm<sup>2</sup>);  $L$  = vão (m);  $t$  = tempo de trânsito da onda ( $\mu$ s);  $\rho$  = densidade aparente do painel (kg/m<sup>3</sup>);  $g$  = aceleração da gravidade: 9,804 m/s<sup>2</sup>.

### 3.3. Propriedades Mecânicas

#### 3.3.1. Ensaio de resistência à flexão estática

Para o ensaio de resistência à flexão estática (Figura 24), foram utilizados os princípios das normas ASTM D 5456 (ASTM, 2006), específica para painéis LVL, e a ASTM D 198 (ASTM, 1999a). O módulo de ruptura ( $f_m$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_m$ ) foram determinados para a posição *flatwise* utilizando-se os mesmo CPs da avaliação não destrutiva e respeitando a relação de vão/espessura 17 vezes estipulada na norma.

A velocidade de carregamento foi 1,2 mm/min. O módulo de ruptura ( $f_m$ ) foi calculado conforme a equação 8 e o módulo de elasticidade ( $E_m$ ) conforme a equação 9. Tais equações geraram resultados em kfg/cm<sup>2</sup>; assim, a fim de converter esta unidade para N/mm<sup>2</sup>, os resultados obtidos foram divididos por 10,18.



**Figura 24.** Realização do ensaio de resistência à flexão estática com aplicação da carga centralizada sobre dois apoios.

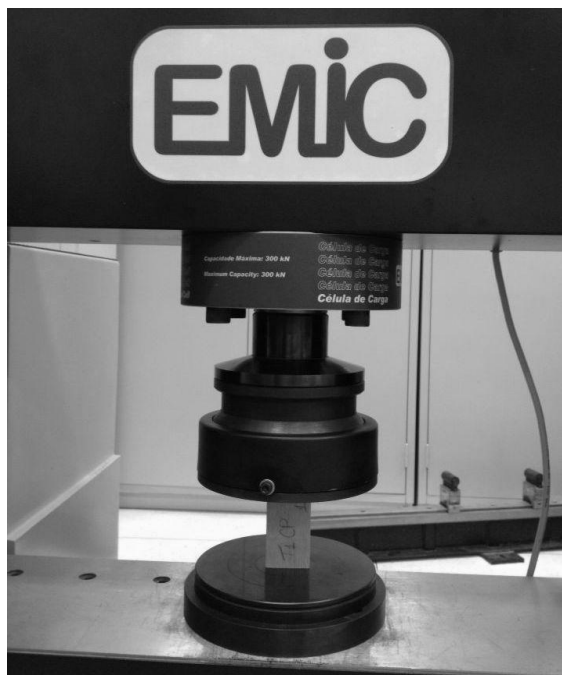
$$f_m \text{ (N/mm}^2\text{)} = \frac{Prup \times L / 4}{b \times h^2 / 6} \quad \text{(Equação 8)}$$

$$E_m \text{ (N/mm}^2\text{)} = \frac{P \times L^3}{48 \times \Delta \times I} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde:  $P_{rup}$  = carga máxima (kgf);  $L$  = vão entre os apoios (cm);  $b$  = largura do corpo-de-prova (cm);  $h$  = espessura do corpo-de-prova (cm);  $P$  = carga no limite proporcional (kgf);  $\Delta$  = flecha (cm);  $I$  = momento de inércia (cm<sup>4</sup>).

### 3.3.2. Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras

Os CPs para o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (Figura 25) foram obtidos do topo dos CPs do ensaio de flexão. Suas dimensões foram adaptadas das normas ASTM D 5456 (ASTM, 2006) e ASTM D 198 (ASTM, 1999a) a fim de satisfazer a mínima relação comprimento/raio de giração de 15 vezes.



**Figura 25.** Realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.

A velocidade de carregamento foi 0,2 mm/min e a resistência à compressão paralela foi calculada de acordo com a equação 10.

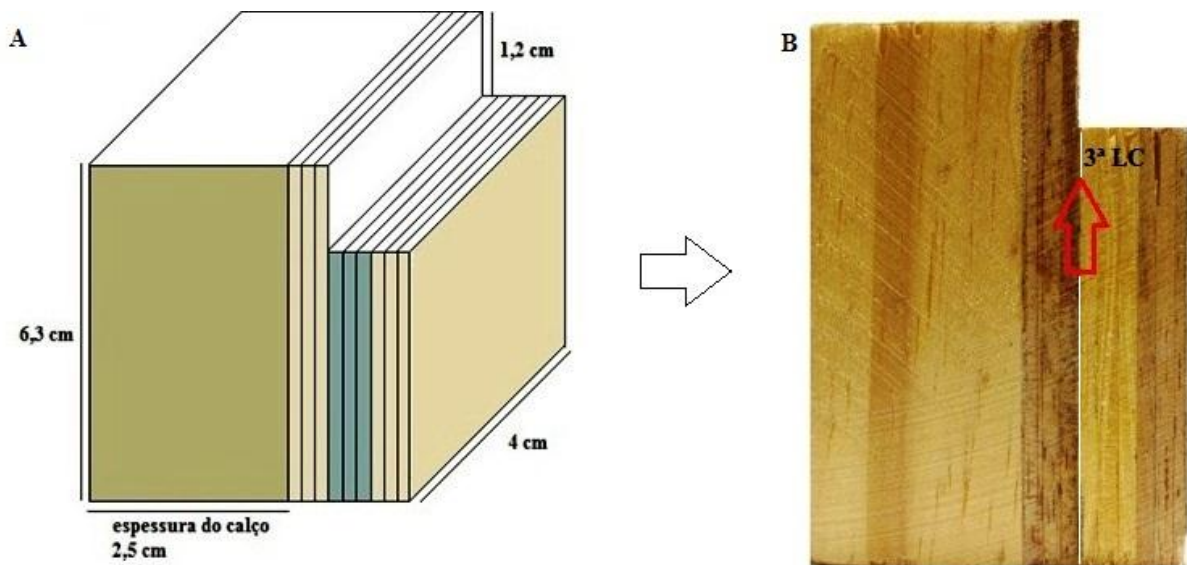
$$f_{c,0} \text{ (N/mm}^2\text{)} = \frac{Prup}{A} \quad \text{(Equação 10)}$$

Onde:  $P_{rup}$  = carga máxima (N);  $A$  = área (mm<sup>2</sup>).

### 3.3.3. Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola

O ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola foi realizado com adaptações as normas ASTM D 5456 (ASTM, 2006) e ASTM D 1037 (ASTM, 1999b). Diante da limitação oferecida pela espessura final dos painéis, fez-se necessário a colagem de um calço de madeira de *Pinus* sp. na parte posterior do CP (Figura 26A) a fim de que este se posicionasse de forma correta na célula de carga da máquina universal.

Considerando também o fato de que houve a utilização de duas espécies na fabricação de alguns painéis, a cadeira para encaixe da célula de carga foi posicionada na terceira linha de cola, justamente na junção entre as espécies (Figura 26B). Mesmo havendo alguns tratamentos sem mistura de espécies, a fim de padronizar o ensaio, o aparato foi também posicionada na terceira linha de cola. Para este ensaio foram confeccionados seis amostras para cada tratamento.



**Figura 26.** A) Croqui do corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo à linha de cola; B) Corpo-de-prova com calço e com cadeira para encaixe na célula de carga na 3ª linha de cola (seta vermelha).

Diante do fato de que o adesivo após sua cura se torna transparente, não foi possível determinar se o rompimento ocorreu na linha de cola ou na madeira. Sendo então calculada somente a resistência de acordo com a equação 11.

$$f_{gv,0} \text{ (N/mm}^2\text{)} = \frac{P_{rup}}{A} \quad \text{(Equação 11)}$$

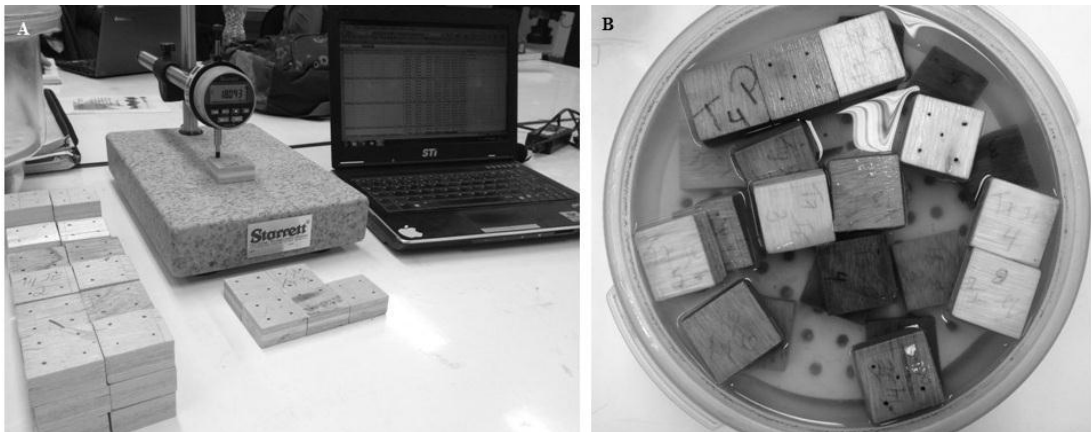
Onde:  $P_{rup}$  = carga máxima (N);  $A$  = área (mm<sup>2</sup>).

### 3.4. Propriedades Físicas - Ensaio de densidade, absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura

A determinação da densidade foi realizada conforme ASTM 2395 (ASTM, 2010) onde a massa e as dimensões das amostras foram tomadas com o auxílio de balança analítica, paquímetro digital e relógio comparador.

Para a realização dos ensaios de absorção de água (ABS), inchamento em espessura (IE) e taxa de não-retorno em espessura (TNRE) foram utilizadas as recomendações da norma ASTM D 1037 (ASTM, 1999b). Os CPs foram produzidos com as dimensões de 4cm x 4cm ( $l$  x  $c$ ) totalizando seis amostras para cada tratamento.

Os corpos-de-prova, climatizados até massa constante, tiveram sua massa e dimensões mensuradas com relógio comparador (Figura 27A). Em seguida foram submersos em água (Figura 27B) e tiveram suas massas e dimensões retomadas as 2, 24 e 96 horas após a imersão. Ao término do ensaio, foram novamente conduzidos à câmara climática e após a estabilização tiveram suas massas e dimensões novamente obtidas. As determinações dos percentuais de ABS, IE e TNRE foram realizadas de acordo com as equações 12, 13 e 14.



**Figura 27.** Realização dos ensaios para determinação das propriedades físicas dos painéis confeccionados: A) Mensurando a espessura com o auxílio de relógio comparador; B) Corpos-de-prova submersos em água.

$$ABS = \left( \frac{M_f - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 12})$$

$$IE = \left( \frac{E_f - E_i}{E_i} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 13})$$

$$TNRE = \left( \frac{E_{24h} - E_c}{E_c} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:  $ABS$  = absorção de água (%);  $M_i$  = massa inicial, anterior à imersão em água (g);  $M_f$  = massa final, posterior à imersão em água (g);  $IE$  = inchamento em espessura (%);  $E_i$  = espessura inicial, anterior à imersão em água (mm);  $E_f$  = espessura final, posterior à imersão em água (mm);  $TNRE$  = taxa de não-retorno em espessura (%);  $E_{24h}$  = espessura posterior a 24 horas de imersão em água (mm);  $E_c$  = espessura posterior a climatização dos CPs (mm).

### 3.5. Análise Estatística

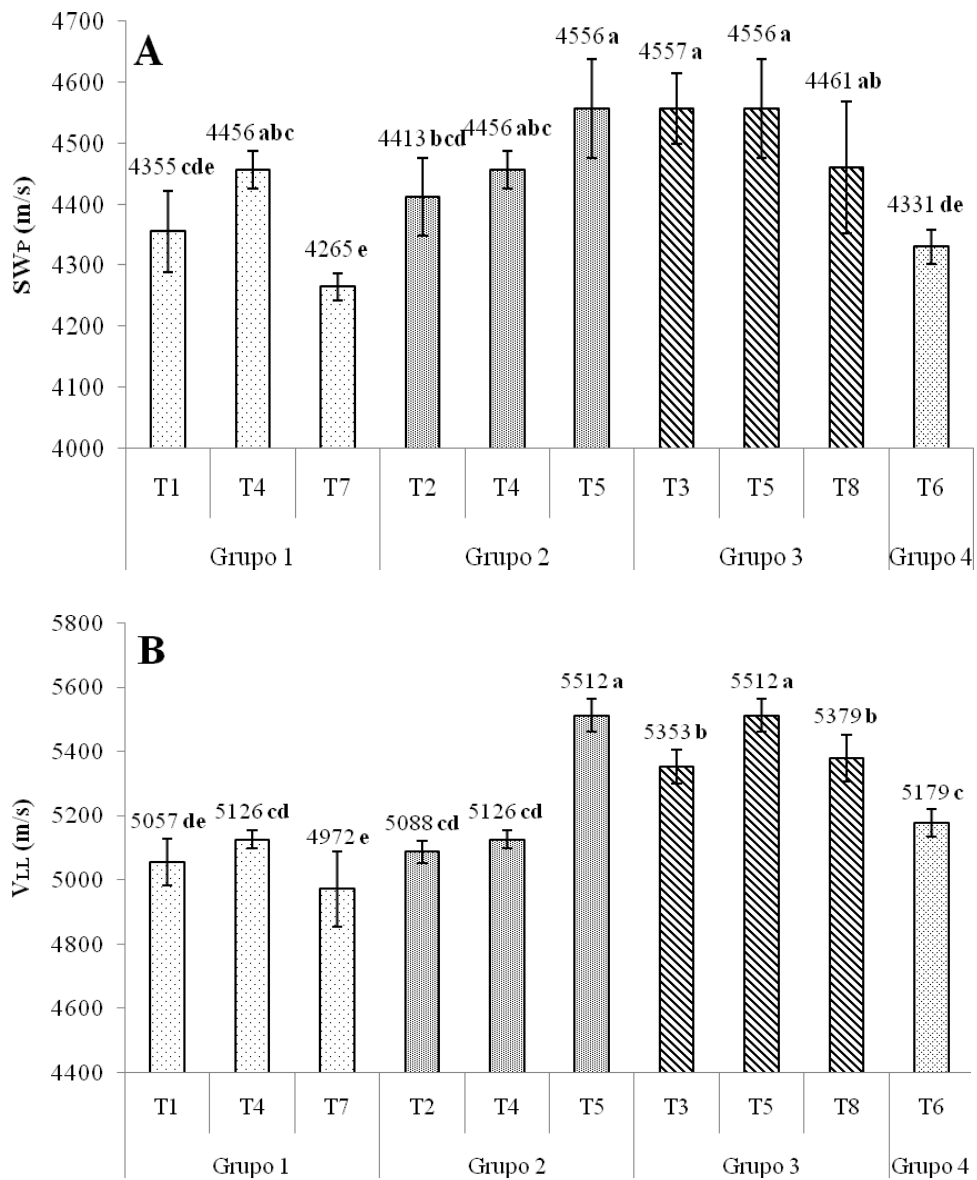
As variáveis da análise não-destrutiva ( $SW_P$ ,  $E_{dsw}$ ,  $V_{LL}$  e  $C_{LL}$ ), assim como as propriedades físicas ( $\rho_P$ ,  $ABS$ ,  $IE$  e  $TNRE$ ) e mecânicas ( $f_m$ ,  $E_m$ ,  $f_{c,0}$  e  $f_{gv,0}$ ) foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas por meio do teste de Tukey a 5% de significância.

Para a predição das propriedades mecânicas a partir da avaliação não-destrutiva, foram gerados modelos de regressão linear simples  $y = ax + b$ , tendo as variáveis não destrutivas ( $SW_P$ ,  $E_{dsw}$ ,  $V_{LL}$  e  $C_{LL}$ ) como independentes e as propriedades mecânicas ( $f_m$ ,  $E_m$ ,  $f_{c,0}$  e  $f_{gv,0}$ ) como variáveis dependentes. Assim, foi avaliada a significância da regressão (ao nível  $\alpha = 5\%$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Avaliação não-destrutiva

Na Figura 28 encontram-se os valores médios das velocidades de propagação da onda geradas pelos dois equipamentos.



**Figura 28.** Valores médios das velocidades de propagação das ondas. A) velocidade de propagação do stress wave; B) velocidade de propagação do ultrassom. T1 – 3A/3Pa/3A; T2 – 3Pk/3A/3Pk; T3 – 3Co/3Pk/3Co; T4 – 9A; T5 – 9Co; T6 – 9Cu; T7 – 9Pa; T8 – 9Pk.

De forma geral, observou-se a tendência de  $V_{LL}$  ser maior que  $SW_P$ . Provavelmente isto pode ser causa da frequência do transdutor do ultrassom (54 KHz); de acordo com Trinca;

Gonçalves (2009) esta frequência influencia diretamente na velocidade de propagação de ondas.

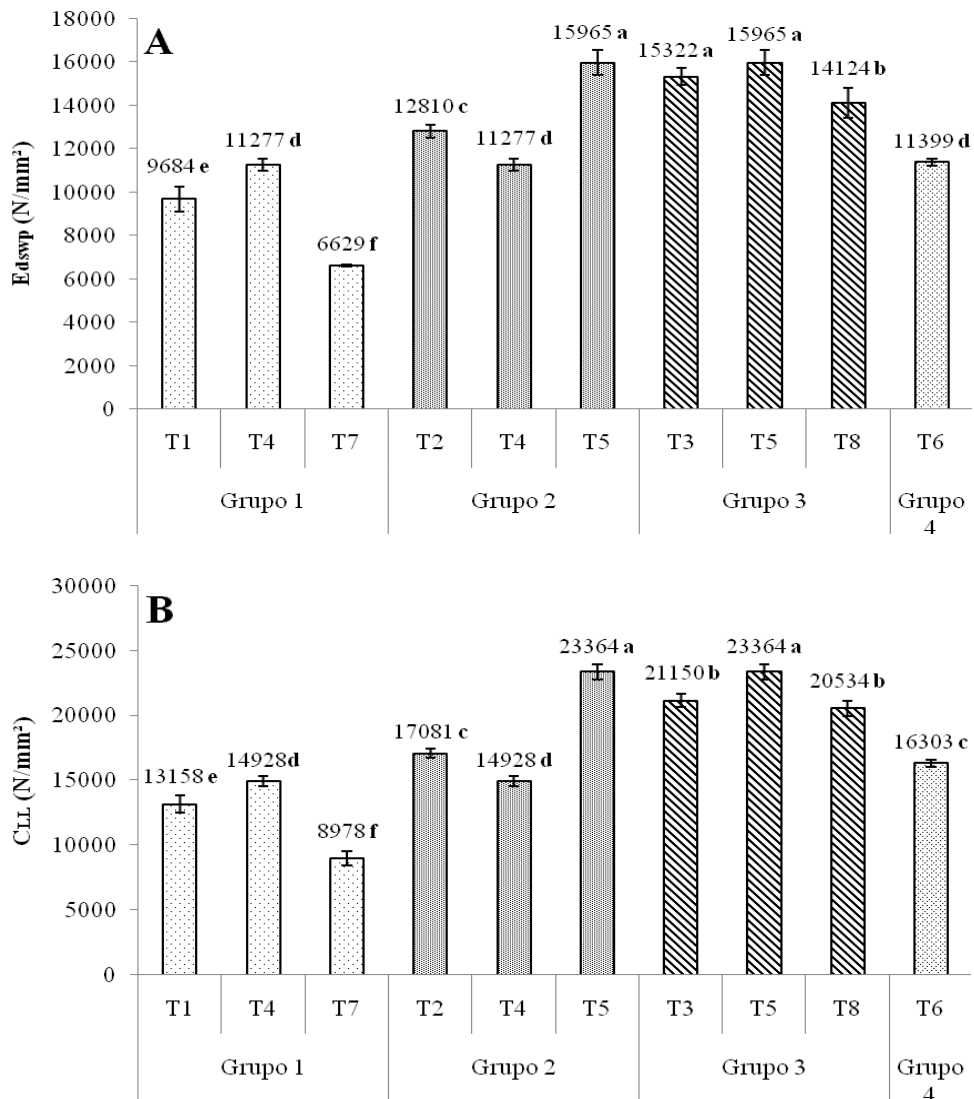
Analisando a velocidade do *stress wave* (Figura 28A), pode-se perceber que essa variável é significativamente diferente para os tratamentos estudados (Tabelas 28 e 29 – anexos). Os maiores valores foram apresentados pelos tratamentos T3 e T5 enquanto que o T7 o menor valor (4265 m/s). Entretanto, pode-se perceber que por mais que esta diferença de valores seja significativa as velocidades variam em torno de 6%, o que demonstra ótima precisão nas medições (STANGERLIN et al., 2010). Desta forma, o valor médio da velocidade de propagação obtido com o *stress wave* (4424 m/s) se aproxima ao valor encontrado por Del Menezzi et al. (2013) trabalhando com LVL fabricado com 8 lâminas de *Schizolobium parahayba* (4445 m/s). Este valor médio também é próximo ao encontrado por Del Menezzi et al. (2010) trabalhando com madeiras tropicais sólidas (4247 m/s). Uma das possíveis causas para esta maior velocidade de propagação no painel que na madeira sólida, pode ser a densificação do material a partir da prensagem, alterando o arranjo anatômico, diminuindo os espaços vazios, fornecendo assim uma melhor continuidade, o que pode influenciar o tempo de percurso da onda.

Comportamento semelhante foi observado na velocidade de propagação da onda ultrassônica (Figura 28B). Os valores encontrados foram significativamente diferentes, sendo maior valor para T5 (5512 m/s); próximo aos encontrados por Gabriel (2007) trabalhando com LVL de 13 lâminas confeccionados com *Pinus sp.* (5418 – 5613 m/s). Já o menor valor de  $V_{LL}$  foi encontrado para T7 (4972 m/s). O valor médio da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (5208 m/s) foram semelhantes ao valor médio encontrado por Gonzalez et al. (2001) trabalhando com madeiras tropicais sólidas (5208 m/s), próximo ao encontrados por Ballarin; Nogueira (2005) trabalhando com madeira sólida de *Pinus taeda* (5124 m/s) e superior ao encontrado por Stangerlin et al. (2010) trabalhando com *Peltophorun dubium*.

Por fim, ao se analisar a influência do agrupamento nas velocidades de propagação, pode-se perceber uma tendência de comportamento no G3; seus tratamentos apresentaram as maiores velocidades de propagação. O G4 encontra-se isolado, enquanto que G1 e G2 apresentam os menores valores. De conformidade com esta observação, nota-se que para as velocidades de propagação, o agrupamento sugerido se reflete de forma mais perceptível sobre o G3 e o G4.

Foram encontradas correlações positiva e significativas (Tabela 36 – anexos) entre a densidade dos painéis e a velocidade de propagação (0,744 e 0,837, para  $SW_P$  e  $V_{LL}$ , respectivamente), o que mostra certa tendência de as velocidades serem maiores em painéis mais densos.

Em seguida, ao analisar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dswp}$ ) e o coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ) (Figura 29), pode-se perceber variações significativas entre os tratamentos. O comportamento geral observado se assemelha ao das velocidades de propagação. Os maiores valores encontrados foram para o T5 (15965 N/mm<sup>2</sup> e 23364 N/mm<sup>2</sup>,  $E_{dswp}$  e  $C_{LL}$ , respectivamente) e os menores para o T7 (6629 N/mm<sup>2</sup> e 8978 N/mm<sup>2</sup>,  $E_{dswp}$  e  $C_{LL}$ , respectivamente).



**Figura 29.** Valores médios das variáveis acústicas. A) módulo de elasticidade dinâmico; B) coeficiente de rigidez. T1 – 3A/3Pa/3A; T2 – 3Pk/3A/3Pk; T3 – 3Co/3Pk/3Co; T4 – 9A; T5 – 9Co; T6 – 9Cu; T7 – 9Pa; T8 – 9Pk



Em seguida, ao se analisar os grupos, novamente o G3 apresenta os maiores valores, enquanto que o G4 fica isolado. Os tratamentos do G2 apresentaram valores intermediários, e os tratamentos do G1 apresentaram os menores valores. No caso destas variáveis, a visualização dos grupos sugeridos é mais nítida, pois G1 e G2 estão apresentando classificação mais característica.

## 4.2. Propriedades físicas

### 4.2.1. *Stress Wave Timer* nas lâminas

A Tabela 9 apresenta os valores médios da velocidade de propagação da onda gerada pelo *Stress Wave Timer* nas lâminas.

**Tabela 9.** Valores médios para a velocidade de propagação da onda gerada pelo *Stress Wave Timer* ( $SW_L$ ) nas lâminas das espécies estudadas.

<b>Espécie</b>	<b>Média (m/s)</b>	<b>CV%</b>
<b>Amescla</b>	4243 b	1,79
<b>Copaíba</b>	4467 a	2,32
<b>Curupixá</b>	4208 b	1,94
<b>Paricá</b>	4188 b	3,78
<b>Visgueiro</b>	4230 b	3,43

$SW_L$ : velocidade da onda nas lâminas das espécies estudadas; CV: coeficiente de variação (%).

Pode-se observar que a velocidade de propagação da onda foi significativamente maior nas lâminas de copaíba (4467 m/s). Tal diferença pode estar associada à sua alta densidade ( $0,65 \text{ g/cm}^3$ ), havendo então uma menor atenuação da onda devido a sua baixa porosidade. De acordo com Gonçalves (2011), a densidade está diretamente relacionada à rigidez da madeira e seu teor de umidade, portanto madeiras mais densas e menos úmidas, apresentam maiores velocidades de propagação. Entretanto, ainda de acordo com esta autora, resultados diferenciados indicam que não há um resultado único para esta questão.

Na Tabela 10 observa-se os resultados da avaliação não-destrutiva das lâminas e dos painéis de forma geral, sem considerar as espécies e os tratamentos. Foi observado que as velocidades de propagação das ondas, por mais que sejam estatisticamente diferentes, são próximas para as lâminas e os painéis LVL, corroborando os resultados encontrados por Del Menezzi et al. (2013). Tal comportamento pode ser causado pela superficialidade de propagação da onda, de forma que no painel a onda se propaga somente na lâmina externa sendo atenuada pela junção adesiva plástica (CUNHA; MATOS, 2010).

**Tabela 10.** Valores médios da velocidade do *stress wave* nas lâminas e nos painéis LVL.

	Média (m/s)	CV%
SW <sub>L</sub>	4269 b	3,66
SW <sub>P</sub>	4427 a	2,89

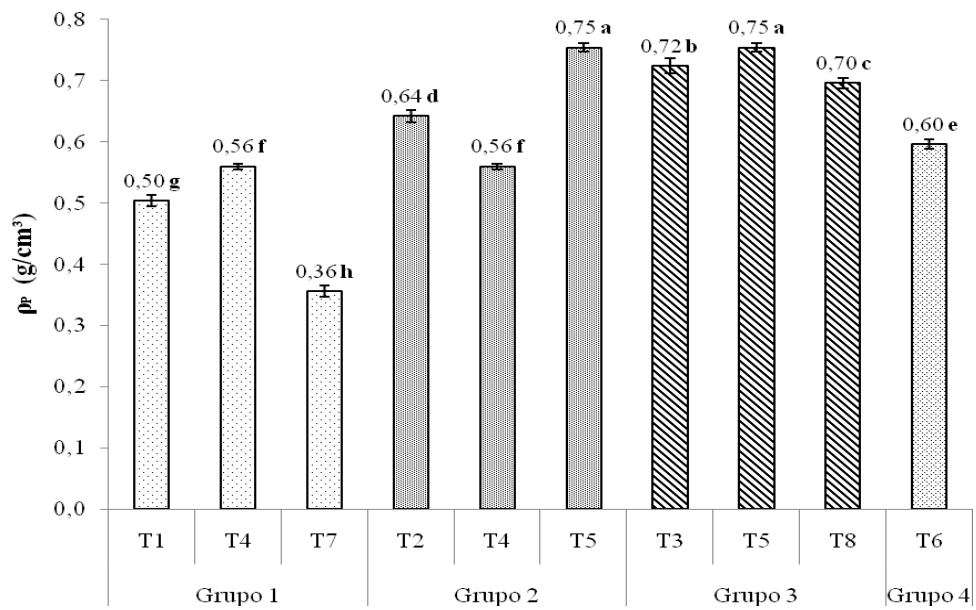
SW<sub>L</sub>: velocidade da onda nas lâminas das espécies estudadas; SW<sub>P</sub>: velocidade da onda nos painéis LVLs confeccionados; CV: coeficiente de variação (%); Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ( $\alpha = 5\%$ ).

#### 4.2.2. Densidade

A Figura 30 apresenta os valores médios da densidade aparente observada para os painéis LVL confeccionados. A análise de variância demonstra que houve diferença significativa ao nível de 1% (Tabelas 18 e 22 – anexos).

A densidade do produto final está intimamente ligada à massa específica da madeira de origem (PIO, 2002). Consequentemente nota-se que T5, T3 e T8 (G3), apresentaram as maiores densidades porque são compostos pelas lâminas mais densas (copaíba – 0,65 g/cm<sup>3</sup> e visgueiro – 0,58 g/cm<sup>3</sup>). Enquanto que T1, T4 e T7 (G1) apresentaram as menores densidades (compostos pelas lâminas menos densas: amescla – 0,46 g/cm<sup>3</sup> e paricá 0,30 g/cm<sup>3</sup>). De forma geral, os painéis apresentaram densidades próximas, porém superiores as das lâminas utilizadas; este fato provavelmente é efeito da densidade do adesivo utilizado, que também compõe o produto final, e a leve compressão das lâminas reduzindo o seu volume e, consequentemente, aumentando sua densidade.

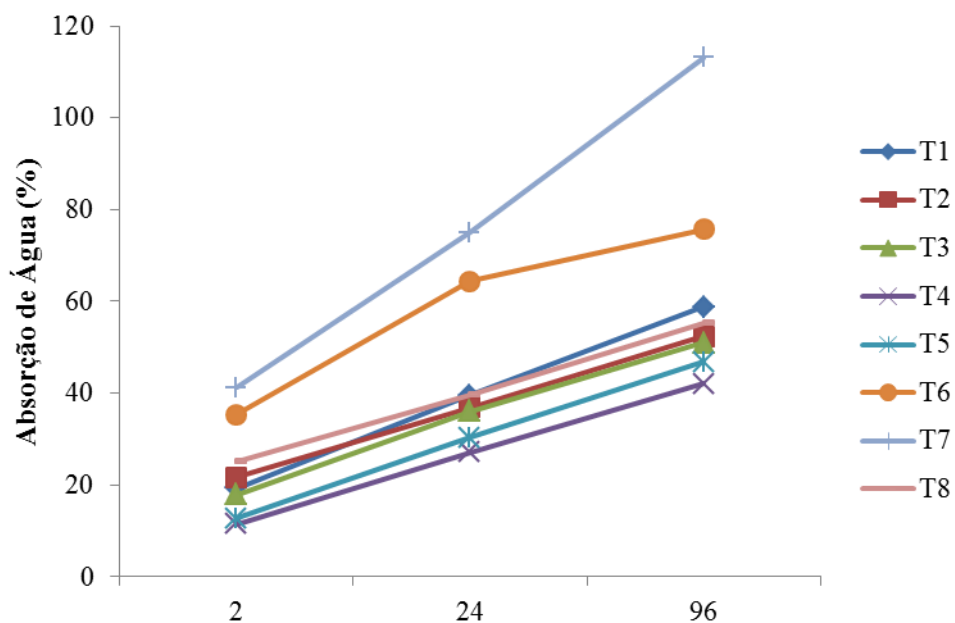
Ao analisar os grupos estudados pode-se observar que o G3 apresentou os maiores valores, sendo cada um de seus tratamentos classificados pelo teste de Tukey em *a*, *b* e *c*. Em seguida, observando o G2 e o G4, nota-se certa variação nos resultados, sendo os tratamentos do G2 classificados em *a*, *d* e *f*, e o G4 classificado como *e*. Por fim, o G1 apresentou os menores valores e seus tratamentos foram classificados em *f*, *g* e *h*. Desta forma, para a variável densidade, o agrupamento das espécies é nitidamente notado nos grupos 3 e 1, enquanto que para G2 e G4 a variação dos resultados é menos perceptível.



**Figura 30.** Valores médios das densidades dos painéis. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk.

#### 4.2.3. Absorção de água e inchamento em espessura

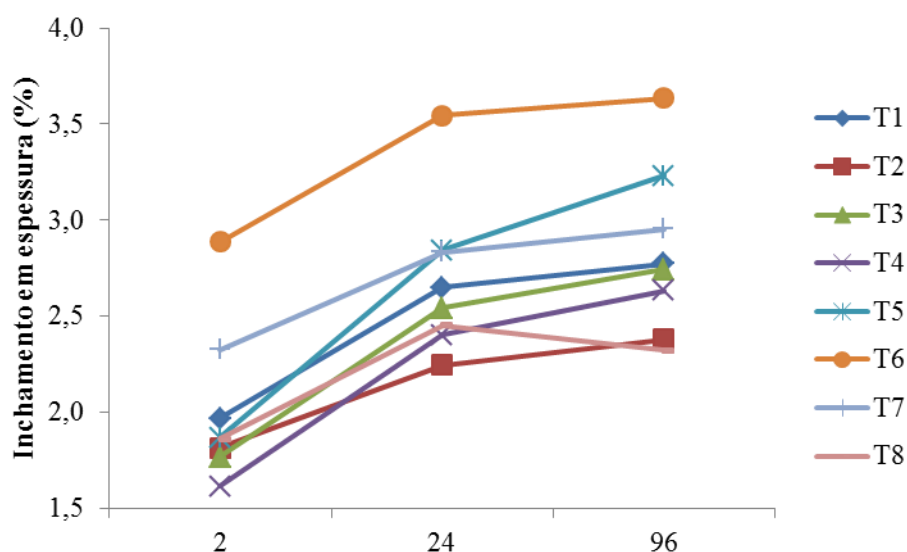
A Tabela 24 (anexos) apresenta os valores da absorção de água (ABS) nos períodos de 2, 24 e 96 horas de imersão e a Figura 31 ilustra a variação temporal deste parâmetro. De acordo com as análises de variância realizadas (Tabelas 19 e 23 – anexos), os valores de ABS são estatisticamente significativos ao nível de 1% nos três períodos.



**Figura 31.** Comportamento dos painéis diante do ensaio de absorção de água. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk.

Foi observado que o T7 tende a absorver mais água comparativamente aos demais (113% para o período de 96h). Possivelmente, sua conformação anatômica proporciona maior quantidade de espaços vazios, visto que a sua densidade é a mais baixa ( $\rho = 0,30 \text{ g/cm}^3$ ). Souza et al. (2010) estudando painéis LVLs confeccionados com *Pinus oocarpa* observaram valores de absorção de água para os períodos de 2, 24 e 96h de 12,5%, 24,4% e 34,5%, respectivamente, e em painéis confeccionados com *P. kesiya* os valores observados foram 29,3%, 40,3% e 45,5%. Nugroho; Ando (2001) estudando painéis LVLs confeccionados com quatro lâminas de bambu (*Phyllostachys pubescens*) observaram valores de absorção de água para os períodos de 2 e 24h, 12,7 % e 24,1%, respectivamente. Portanto, os valores de absorção de água observados neste trabalho estão condizentes com a literatura.

Com relação ao inchamento em espessura, a Tabela 26 (anexos) apresenta os valores médios desta propriedade nos períodos de 2, 24, e 96 horas de imersão em água a Figura 32 ilustra a variação temporal deste parâmetro. A análise de variância (Tabelas 20 e 25 – anexos) indicou que o IE variou significativamente para os três períodos entre os tratamentos.



**Figura 32.** Comportamento dos painéis diante do ensaio de absorção de água. T1 – 3A/3Pa/3A; T2 – 3Pk/3A/3Pk; T3 – 3Co/3Pk/3Co; T4 – 9A; T5 – 9Co; T6 – 9Cu; T7 – 9Pa; T8 – 9Pk.

Em média o inchamento em espessura aumenta aproximadamente 34% do primeiro período para o segundo, e, somente 5,2% do segundo período para o terceiro, demonstrando que os painéis incham relativamente pouco após as 24h de imersão, mantendo o comportamento observado. Foi observado que, de uma forma geral, os tratamentos 5, 6 e 7 tendem a ter um IE nos três períodos superior aos demais tratamentos (assim como na ABS). De acordo com Del Menezzi (2006), o inchamento em espessura dos painéis de madeira se

deve a dois fatores: o inchamento higroscópico (adsorção de água nas paredes celulares) e o inchamento pela liberação das tensões de compressão. Assim, possivelmente as tensões de compressão impostas aos painéis dos tratamentos 6 e 7 foram liberadas de uma forma mais rápida que nos demais tratamentos. Portanto, uma vez que os painéis destes tratamentos tiveram sua espessura aumentada em função do inchamento proporcionado pela exposição à umidade, provavelmente ocorre uma tendência na redução de sua massa específica e, conseqüentemente, uma perda de resistência destes painéis.

Haygreen; Bowyer (1996) e Ozarka (1999) citam que os adesivos influenciam a estabilidade dimensional dos painéis em relação ao ganho na qualidade da colagem. O adesivo utilizado na confecção dos painéis deste trabalho, PVA<sub>c</sub>, considerado como semiestructural (USDA, 2010), e quando acrescido de catalisadores aceleram a reação de cura por meio da ativação de reações químicas de polimerização (*crosslinking*); desta forma, estas são responsáveis por aumentar a resistência à água.

Uma das preocupações nestes ensaios era a instabilidade dimensional dos tratamentos com mistura de espécies. Como pode ser observado nas Tabelas 24 e 26 (anexos), estes apresentaram comportamento semelhante a outros tratamentos. Comparativamente, os valores observados são condizentes aos observados na literatura (SHUKLA; KAMDEM, 2008; SOUZA et al., 2010; MELO, 2012), entretanto ficam aquém dos valores observados por Nugroho; Ando (2001), 5,90% e 12,10% para os períodos de 2 e 24h trabalhando com LVLs de bambu.

A análise da influência do agrupamento nestas propriedades foi difícil de ser realizada, pois a classificação fornecida pelo teste de Tukey foi diferente para cada período de imersão e, também, para os dois ensaios. No ensaio de ABS, nota-se que o T7 foi classificado como *a* nos três períodos de imersão; comportamento tal, distinto dos outros dois tratamentos (T1 e T4) pertencentes ao seu grupo (G1) que apresentaram classificação variando de *c* até *f*, demonstrando então a tendência de que o agrupamento sugerido não foi refletido neste caso. O mesmo ocorre ao analisar o G2 e o G3; os tratamentos que os compõe possuem mesmas classificações (variando de *c* até *f*) não se tornando nítida a percepção do agrupamento. Contudo, o T6 foi o único tratamento classificado como *b*, demonstrando ser um grupo (G4) isolado e por isso reflete o agrupamento sugerido. Este comportamento também é visível no ensaio de IE; o T6 também se comporta como grupo isolado sendo classificado em todos os períodos de imersão como grupo *a* e G1, G2 e G3 não são nitidamente perceptíveis.

#### 4.2.4. Taxa de não-retorno em espessura

A Tabela 11 apresenta os valores da taxa de não-retorno em espessura (TNRE) observados nos painéis confeccionados. De acordo com as Tabelas 21 e 27 (anexos), verificou-se que a análise de variância indicou o variação significativa entre os tratamentos avaliados.

**Tabela 11.** Valores médios para a taxa de não-retorno em espessura (TNRE %).

Tratamento	Média %	CV %
<b>T1</b>	2,37 a	1,0
<b>T2</b>	1,77 cd	11,5
<b>T3</b>	2,05 bc	5,2
<b>T4</b>	2,08 ab	5,2
<b>T5</b>	2,29 ab	8,7
<b>T6</b>	2,32 ab	9,8
<b>T7</b>	2,07 abc	3,6
<b>T8</b>	1,59 d	9,5

\*\* significativo ao nível de 1%. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk.

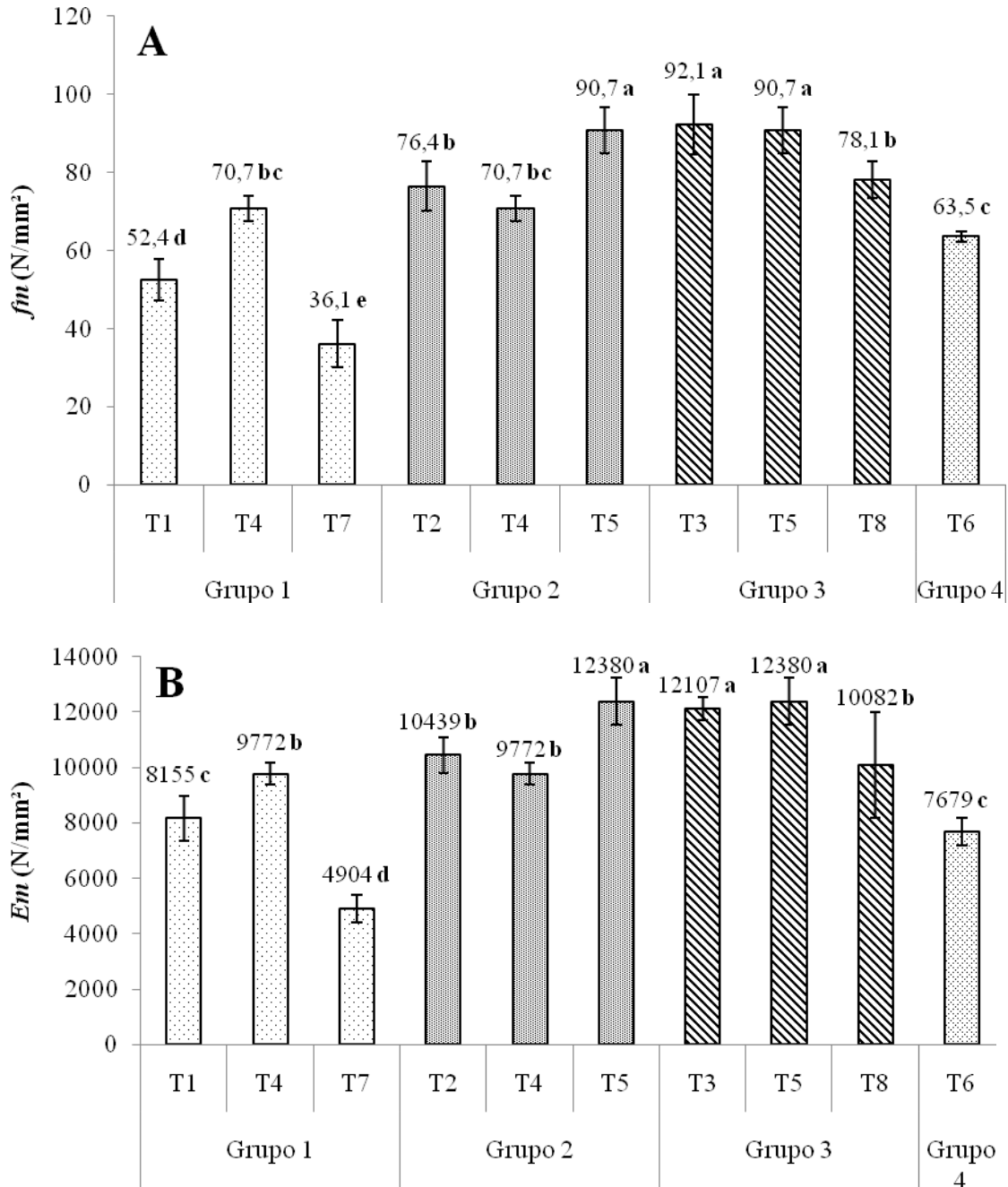
Segundo Del Menezzi (2006), a TNRE representa o inchamento definitivo do painel, oriundo da liberação das tensões internas de compressão. Quando o painel entra em contato com a água, ele incha e também libera tensões de compressão. Quando o painel é seco, a madeira contrai retornando em espessura apenas até o ponto referente ao inchamento próprio da madeira. A madeira não volta à sua espessura inicial devido à liberação das tensões de compressão. Esse inchamento residual ou definitivo é representado pela TNRE. Desta forma, nota-se que T1, T4, T5 e T6, com maiores valores de TNRE, foram os tratamentos que apresentaram maior inchamento residual. Considerando ainda a Tabela 15, nota-se que a TNRE apresentou valores baixos, variando de 1,59 a 2,32%. Valores próximos ao encontrado por Arruda et al. (2011) trabalhando com compensados fabricados com lâminas de paricá tratadas termicamente.

### 4.3. Propriedades Mecânicas

#### 4.3.1. Resistência à flexão estática (*flastwise*)

A Figura 33 apresenta os valores observados para a propriedade de resistência (Módulo de ruptura -  $f_m$ ) e rigidez (Módulo de elasticidade -  $E_m$ ) e dos painéis LVLs confeccionados de acordo com os tratamentos (Tabelas 30 e 31 – anexos). Para o módulo de

ruptura pode-se observar que o T3 apresentou o maior valor (92,1 N/mm<sup>2</sup>), enquanto que o T7 o menor valor (36,1 N/mm<sup>2</sup>). Já para o módulo de elasticidade, T5 apresentou o maior valor (12380 N/mm<sup>2</sup>) e T7 o menor valor (4904 N/mm<sup>2</sup>).



**Figura 33.** Valores médios: A) Módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) Módulo de elasticidade ( $E_m$ ). T1 – 3A/3Pa/3A; T2 – 3Pk/3A/3Pk; T3 – 3Co/3Pk/3Co; T4 – 9A; T5 – 9Co; T6 – 9Cu; T7 – 9Pa; T8 – 9Pk.

Houve correlação positiva e significativa (Tabela 36 – anexos) para ambas as variáveis em relação à densidade (0,940 e 0,883,  $f_m$  e  $E_m$ , respectivamente), demonstrando a tendência

de maior resistência e rigidez aos painéis mais densos. Comportamento semelhante foi observado por Fonselius (1997) ao confeccionar painéis LVL de *Picea abies* e *Pinus sylvestris*. Em seu trabalho, o autor classifica os painéis em três classes de densidade e observa que os painéis mais densos apresentam maior  $f_m$ , variando de 40,7 N/mm<sup>2</sup> (painel menos denso – 0,43 g/cm<sup>3</sup>) a 58,5 N/mm<sup>2</sup> (painel mais denso – 0,52 g/cm<sup>3</sup>). A mesma tendência ocorre para o módulo de elasticidade:  $E_m$  varia de 9730 a 13886 N/mm<sup>2</sup>.

Comparativamente, os valores encontrados para T2, T3, T4 e T5 são próximos aos encontrados por Bortoletto Júnior (2009) para painéis LVL fabricados com 18 lâminas de *Pinus merkusii* ( $f_m$ : 93 N/mm<sup>2</sup>;  $E_m$ : 15.000 N/mm<sup>2</sup>), aos observados por Kamala et al. (1999) com 17 lâminas de *Hevea brasiliensis* ( $f_m$ : 86 N/mm<sup>2</sup>;  $E_m$ : 9234 N/mm<sup>2</sup>), e também, aos observados por Çolak et al. (2004) para painéis LVL confeccionados com 6 lâminas de *Pinus sylvestris*, avaliando diferentes adesivos, ( $f_m$ : variando de 90 a 102 N/mm<sup>2</sup>). Os menores valores (T1, T6 e T7) se aproximam mais aos encontrados por Melo (2012) trabalhando com painéis variando de 8 a 14 lâminas de *Schizolobium amazonicum* ( $f_m$ : 52 N/mm<sup>2</sup>;  $E_m$ : 9391 N/mm<sup>2</sup>); entretanto o módulo de elasticidade do T7 fica aquém do observado pelo mesmo autor.

Observando os primeiros tratamentos dos grupos 1, 2 e 3 (tratamentos em que houve mistura de espécies – T1, T2 e T3), nota-se que de forma geral seus valores não são maiores que os encontrados para os tratamentos homogêneos (painéis LVL fabricados com uma única espécie). Outro fator perceptível, é que dentre os painéis com mistura, o T3 apresenta maiores resultados quando comparado a T2 e T1; possivelmente pelo fato de que a espécie utilizada na borda deste tratamento é mais densa que as espécies utilizadas nas bordas dos outros dois tratamentos (amescla e visgueiro).

Este comportamento reitera o observado por Iwakiri et al. (2010); estes autores trabalhando com espécies diferentes na confecção de painéis LVL, encontraram valores de  $f_m$  e  $E_m$  maiores para os painéis em que as lâminas mais densas foram colocadas nas bordas. Dois tratamentos foram testados: ambos continham lâminas de *Schizolobium amazonicum* no miolo, mas se diferenciavam pelas bordas; um tratamento com *Eucalyptus saligna* nas bordas (lâminas com 0,58 g/cm<sup>3</sup>) apresentaram  $f_m$  de 75,7 N/mm<sup>2</sup> e  $E_m$  de 14.286 N/mm<sup>2</sup>, enquanto que os painéis com *Pinus taeda* (lâminas com 0,42 g/cm<sup>3</sup>) apresentaram  $f_m$  de 43,6 N/mm<sup>2</sup> e  $E_m$  de 3944 N/mm<sup>2</sup>. Ademais, de forma a comparar T1, T2 e T3, H'ng et al. (2010) também trabalhando com mistura de espécies, estabeleceram diferentes combinações de misturas para



painéis LVL (confeccionados com 11 e 15 lâminas) onde *Alstonia sp.*, *Endospermum sp.* e *Bombax sp.*, madeiras de baixa densidade, foram dispostas no miolo e lâminas de *Dipterocarpus sp.* (de maior densidade) foram dispostas nas bordas, e encontraram valores de  $f_m$  variando de 35 a 78 N/mm<sup>2</sup>, e valores de  $E_m$  variando de 9684 a 15285 N/mm<sup>2</sup>.

Por estes resultados, aponta-se que quando há mistura de espécies, a disposição das lâminas de maior densidade nas bordas converge para maiores valores de resistência e rigidez, provavelmente por se tratar da região onde são submetidas as tensões de tração e de compressão. Esta inferência, corrobora a afirmativa de Wang et al. (2003) de que a incorporação de material mais denso em painéis LVLs de madeiras leves aumenta significativamente a resistência e a rigidez do painel.

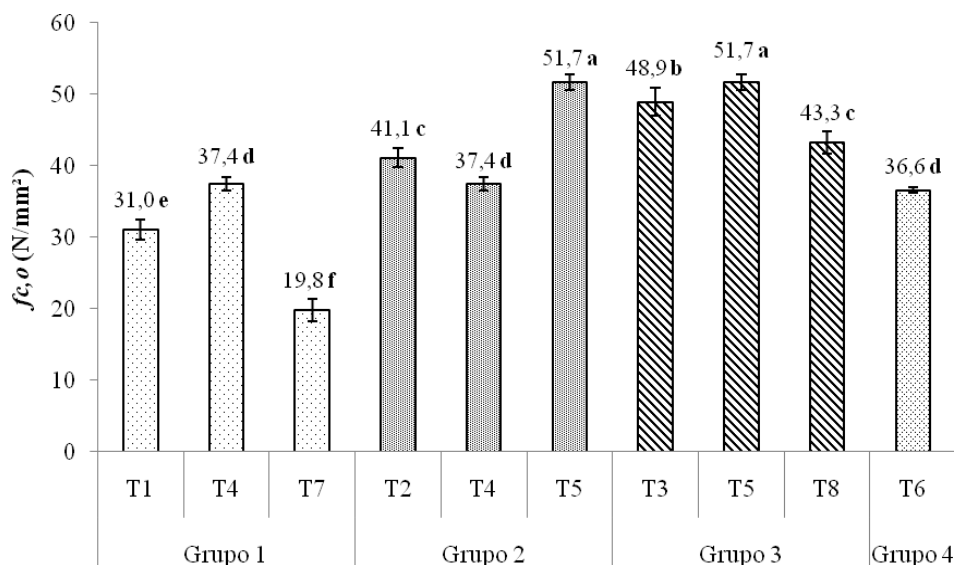
Ao analisar os grupos (G1, G2, G3 e G4) pode-se observar que o G3 (valor médio:  $f_m = 86,9$  N/mm<sup>2</sup>;  $E_m = 11523$  N/mm<sup>2</sup>) apresentou os maiores valores. Em seguida, o G2 (valor médio:  $f_m = 79,3$  N/mm<sup>2</sup>;  $E_m = 10864$  N/mm<sup>2</sup>) apresenta valores menores. Na sequência, G4, recebe classificação c, mostrando ser um grupo de valores intermediários. Finalizando com o G1 (valor médio:  $f_m = 53,1$  N/mm<sup>2</sup>;  $E_m = 7610$  N/mm<sup>2</sup>), de menores valores. Desta forma, para as variáveis de resistência e rigidez, o agrupamento sugerido é perceptível superficialmente, pois a classificação não demonstra separação nítida entre o G2 e o G3. Por fim, T7 destoa visivelmente de seu grupo apresentando resultado menor e sendo classificado de forma isolada.

#### 4.3.2. Resistência à compressão paralela às fibras

A Figura 34 apresenta os valores médios da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c,0}$ ) nos painéis confeccionados. Observou-se que há diferença estatística significativa entre os tratamentos (Tabelas 30 e 31 – anexos).

Foi observado maior valor de resistência para o G3: T5 (51,7 N/mm<sup>2</sup>), seguido por T3 (48,9 N/mm<sup>2</sup>) e T8 (43,3 N/mm<sup>2</sup>). Resultados semelhantes foram observados para painéis LVLs de *Pinus merkusii*, 49 N/mm<sup>2</sup> (BORTOLETTO JÚNIOR, 2009) e painéis de *Hevea brasiliensis*, 48,3 N/mm<sup>2</sup> (KAMALA et al., 1999). Seguindo o comportamento do ensaio de resistência à flexão estática, o G3, composto pelos painéis mais densos, apresentaram valores superiores aos demais tratamentos, enquanto que o T7, painel menos denso, apresenta o menor resistência, 19,8 N/mm<sup>2</sup> - próximo ao encontrado por Melo (2012) para painéis de

mesma espécie, 26 N/mm<sup>2</sup>. A correlação entre as variáveis (Tabela 36 – anexos) é positiva e significativa, 0,972, demonstrando esta tendência.



**Figura 34.** Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c,0}$ ). T1 – 3A/3Pa/3A; T2 – 3Pk/3A/3Pk; T3 – 3Co/3Pk/3Co; T4 – 9A; T5 – 9Co; T6 – 9Cu; T7 – 9Pa; T8 – 9Pk.

Ao analisar os grupos pode-se observar que o G3 apresentou os maiores valores (valor médio = 48 N/mm<sup>2</sup>). Em seguida, o G2 (valor médio = 43,4 N/mm<sup>2</sup>) apresenta valores intermediários. G4 configurou mais uma vez ser um grupo de transição, G4 (36,6 N/mm<sup>2</sup>) e G1 (valor médio = 29,4 N/mm<sup>2</sup>), com os menores resultados; demonstrando estes tratamentos a tendência de comportarem de forma isolada, tornando a percepção do grupo difícil neste caso.

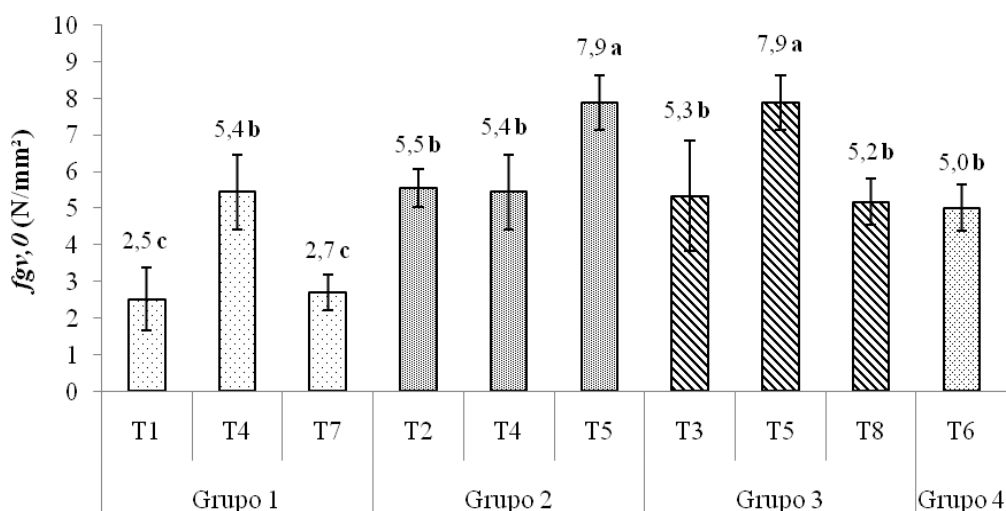
Na Figura 35, pode-se perceber que em alguns corpos-de-prova houve delaminação. Esta ocorreu em três CPs do tratamento 1, na linha de cola entre as lâminas de Paricá. Este processo pode ter influenciado o baixo valor médio encontrado (31 N/mm<sup>2</sup>), e possivelmente foi efeito de gramatura insuficiente para as lâminas desta espécie, que sendo mais rugosas e mais porosas, podem ter absorvido o adesivo com mais rapidez que as demais antes do momento de prensagem. No T7 não houve delaminação, entretanto tal situação pode também ser causa do baixo resultado encontrado.



**Figura 35.** Delaminação em corpo-de-prova do tratamento 1 (painéis LVL produzidos com lâminas de amescla e paricá).

#### 4.3.3. Resistência ao cisalhamento paralelo à linha-de-cola

A Figura 36 apresenta os valores do cisalhamento paralelo à linha-de-cola ( $f_{gv,0}$ ). Percebeu-se que houve diferença significativa (Tabelas 30 e 31 – anexos).



**Figura 36.** Valores médios da resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). T1 – 3A/3Pa/3A; T2 – 3Pk/3A/3Pk; T3 – 3Co/3Pk/3Co; T4 – 9A; T5 – 9Co; T6 – 9Cu; T7 – 9Pa; T8 – 9Pk.

De forma geral, os resultados encontrados ficaram abaixo dos encontrados por Gabriel (2007) para a resistência ao cisalhamento na linha de cola (9,07 N/mm<sup>2</sup>) de painéis LVL fabricados de *Pinus* sp., aos encontrados por Kamala et al. (1999), 9,2 N/mm<sup>2</sup> para painéis de *Hevea brasiliensis* e aos encontrados por Souza et al. (2010): 8,7 N/mm<sup>2</sup> (LVL de *Pinus oocarpa*) e 9,8 N/mm<sup>2</sup> (*Pinus kesiya*). Entretanto Shukla; Kamden (2008) confeccionando painéis LVL de *silver maple* (*Acer saccharinum*), *yellow poplar* (*Liriodendron tulipifera*) e

*aspen* (*Populus tremuloides*) também observaram baixos valores de  $f_{gv,0}$ : 2,52, 1,84 e 2,23 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente. Assim como Çolak et al. (2004) para os painéis LVL confeccionados com *Pinus sylvestris*:  $f_{gv,0}$  variando de 2,52 a 2,96 N/mm<sup>2</sup>. Deve-se considerar contudo que cada trabalho confeccionou seus painéis utilizando adesivos, números de lâminas, gramaturas, temperaturas e pressões diferentes, o que é responsável por esta variação de resultados.

Ao avaliar os grupos pode-se observar que o agrupamento sugerido não é diretamente nítido nesta variável. A correlação entre esta propriedade mecânica e a densidade é positiva e significativa (0,752 – Tabela 36, anexos) porém é a menor correlação quando comparada as demais propriedades mecânicas ( $f_m, E_m, f_{c,0}$ ).

Assim como a delaminação observada no ensaio de compressão paralela às fibras, as lâminas de paricá possivelmente exercem influência sobre os resultados de T1 e T7. Menos densas (0,30 g/cm<sup>3</sup>) e mais rugosas ( $R_a = 12,4$ ) tendem a absorver mais adesivo, interferindo na uniformidade de sua aplicação. Estes resultados corroboram os baixos valores também encontrados por Melo (2012) para painéis LVL de paricá (em média 4,2 N/mm<sup>2</sup>). Aydin et al. (2004) citam que a gramatura deve ser maior em lâminas mais rugosas, portanto, indica-se a necessidade de mais pesquisas sobre a gramatura a ser aplicada sobre as lâminas desta espécie. Diante do fato de que o adesivo após sua cura se tornar transparente, não foi possível determinar se o rompimento ocorreu na linha de cola ou na madeira. Entretanto, de forma geral, o rompimento ocorreu na madeira, demonstrando boa qualidade da linha de cola (Figura 37).

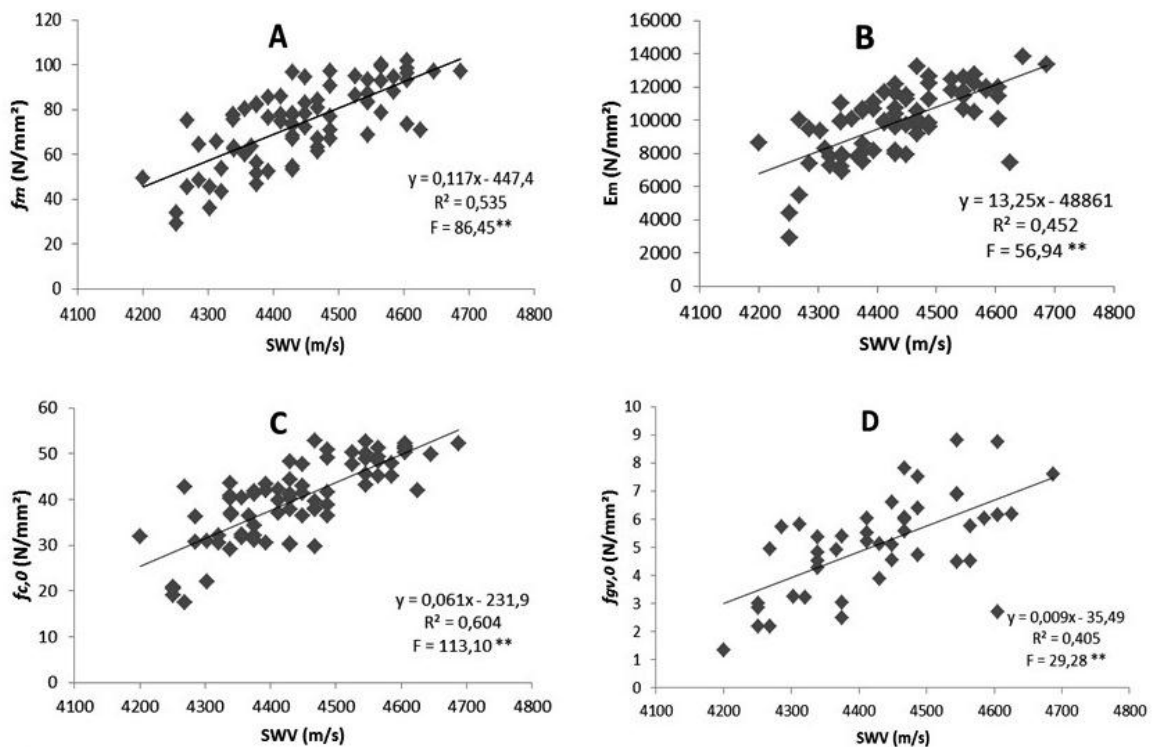


**Figura 37.** Ruptura em cisalhamento paralelo à linha de cola para os painéis confeccionados por tratamento. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk.

#### 4.4. Estimativa das propriedades mecânicas

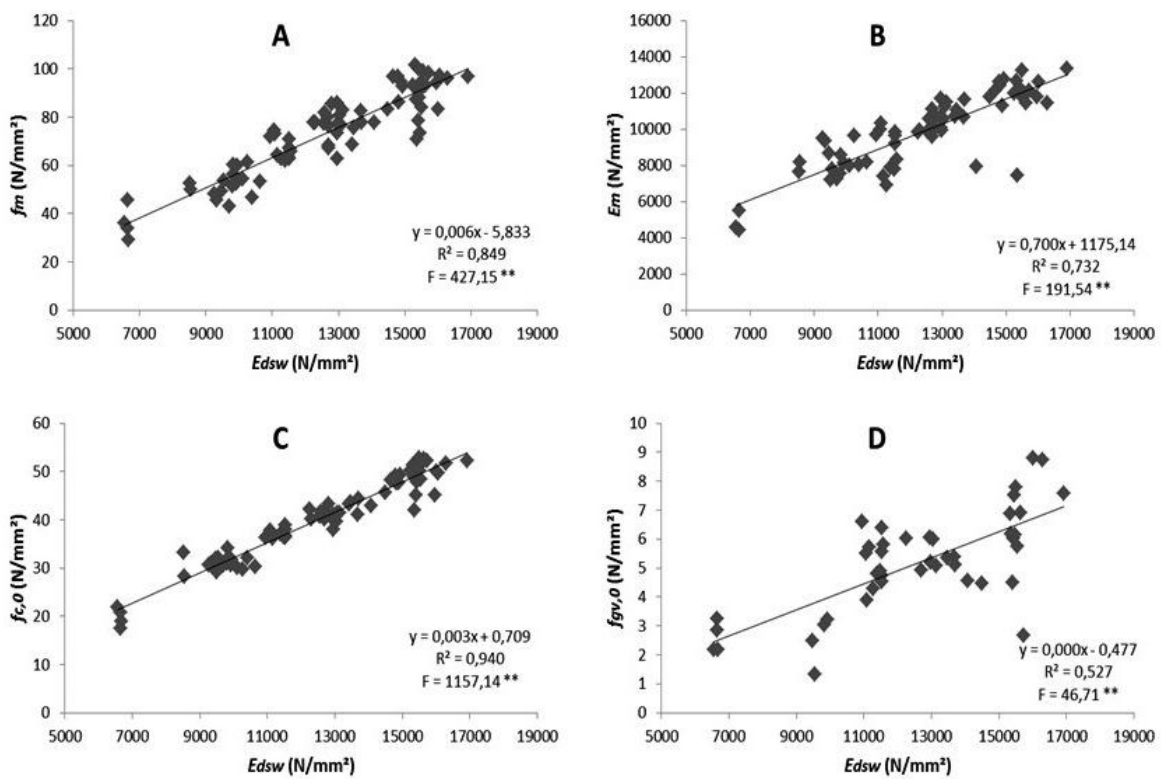
A estimativa das propriedades mecânicas foi feita em duas partes: primeiro foram analisadas as variáveis de forma agrupada, ou seja, reunindo todos os tratamentos em um único grupo. Em seguida foi analisada separadamente por tratamento.

A análise de todos os tratamentos em um único conjunto mostrou ótimos resultados na estimativa das propriedades quando a velocidade do *stress wave* ( $SW_P$ ) foi utilizada como estimador (Figura 38). Destaca-se que estas análises foram significativas ao nível de 1%, e a  $SW_P$  explicou 53,5% da variação dos dados do módulo de ruptura ( $f_m$ ), 45,2% da variação dos dados do módulo de elasticidade ( $E_m$ ), 60,4% da variação dos dados da resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ) e 40,5% da variação dos dados da resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). Os modelos obtidos para a estimativa das propriedades por tratamento não foram significativas (Tabela 32 – anexos). Souza et al. (2010) também encontraram um modelo significativo, contudo este foi para a predição do  $E_m$  em função da velocidade do *stress wave* para painéis LVL confeccionados por *Pinus kesya*.



**Figura 38.** Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função da velocidade de propagação da onda do *stress wave* ( $SW_P$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) Resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ).

Para prever as propriedades mecânicas em função da velocidade do *stress wave* não é necessário medir a densidade do painel, o que para fins industriais representa grande agilidade. Entretanto, na busca de melhores análises de regressão, analisou-se também a predição das propriedades mecânicas em função do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dsw}$ ) (Figura 39). De forma geral as regressões foram significativas ao nível de 1%, e apresentaram melhores coeficientes de determinação que os gerados pelas regressões em função da velocidade (Tabela 33 – anexos). O módulo de ruptura ( $f_m$ ) teve 84,9% de sua variação explicada, enquanto o módulo de elasticidade ( $E_m$ ) teve 73,2% e a resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ) teve 52,7%. Somente a resistência à compressão paralela teve  $R^2$  superior a 90% (94%). Del Menezzi et al. (2013) trabalhando com painéis LVL de *Schizolobium parahayba* encontraram um modelo significativo para prever esta propriedade mecânica ( $f_{c,0}$ ), porém menor que o encontrado neste trabalho ( $R^2 = 0,698$ ).



**Figura 39.** Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dsw}$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ).

Contudo, ao considerarmos os modelos obtidos para a estimativa das propriedades mecânicas dos tratamentos (Tabela 33 – Anexos) em função do  $E_{dsw}$ , a maioria das regressões não foi significativa. Observa-se que dos oito tratamentos estudados, apenas dois

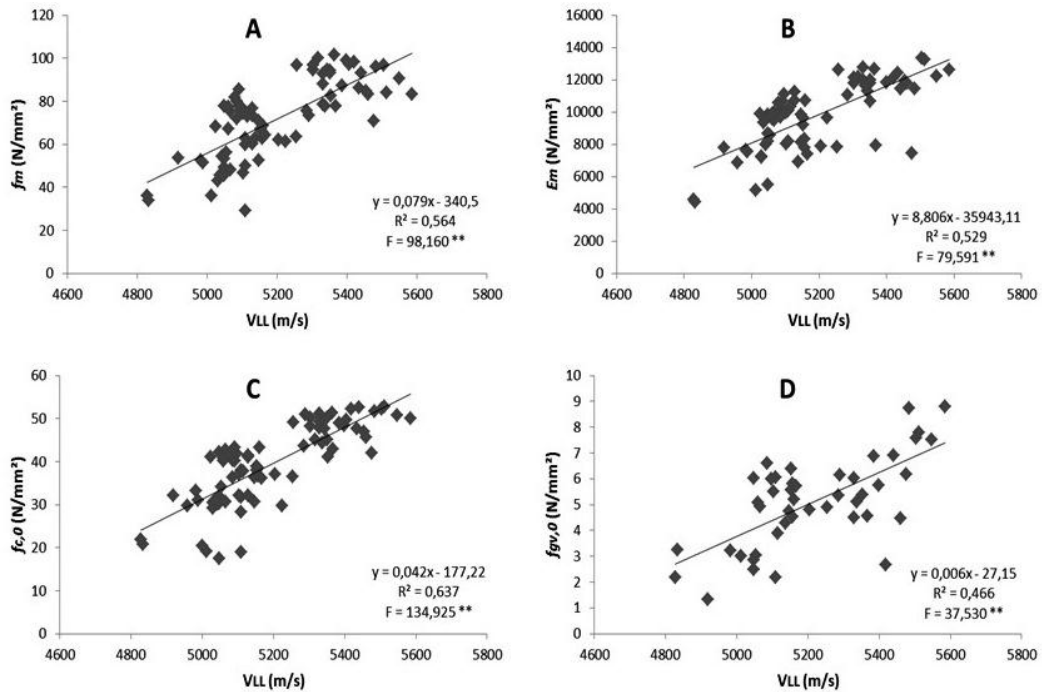
modelos foram estatisticamente significativos em duas propriedades distintas. Para o T4 o modelo obtido para a estimativa do módulo de ruptura ( $f_m$ ) explicou 66% da variação dos seus dados, enquanto que o modelo obtido para a estimativa do módulo de elasticidade ( $E_m$ ) do T2 explicou apenas 30%.

A fim de realizar também a predição das propriedades mecânicas em função das variáveis não-destrutivas geradas pelo método do ultrassom ( $V_{LL}$  e  $C_{LL}$ ), as figuras 40 e 41 demonstram tais análises de regressão, respectivamente. De forma geral, as análises de todos os tratamentos em conjunto foram significativas ao nível de 1%. Constata-se que o  $V_{LL}$  explicou 56,4% da variação dos dados do módulo de ruptura ( $f_m$ ), 52,9% da variação dos dados do módulo de elasticidade ( $E_m$ ), 63,7% da variação dos dados de resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ) e, somente, 46,6% da variação dos dados de resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ). Dentre esses coeficientes de determinação, a utilização do  $V_{LL}$  na estimativa das propriedades mecânicas foi mais adequada para  $f_{c,0}$ .

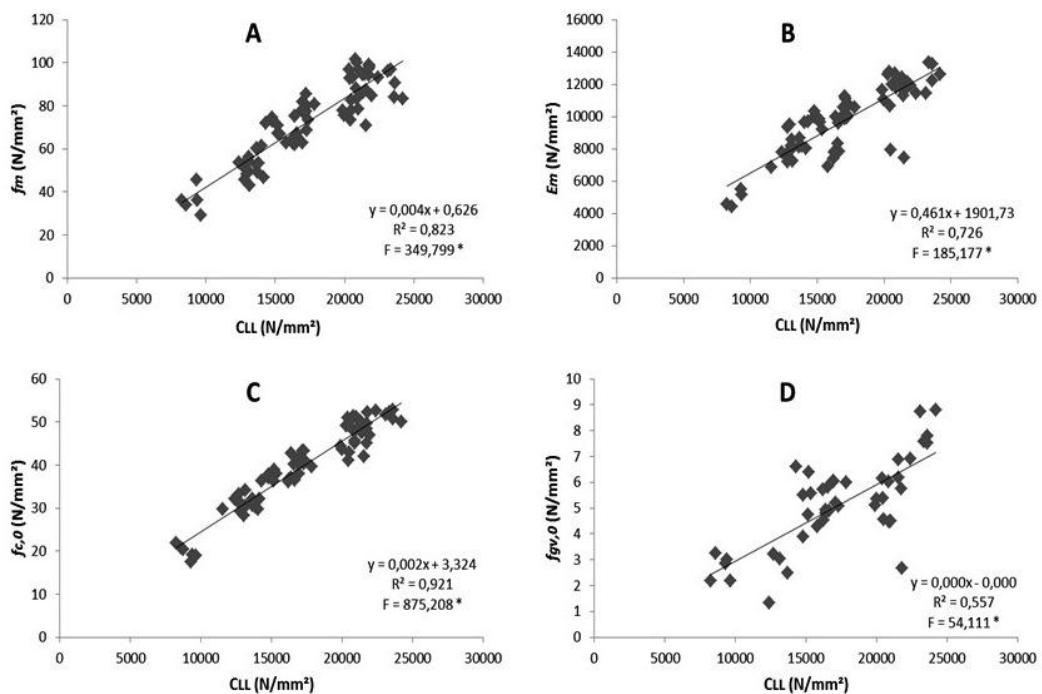
Na análise dos modelos obtidos para a estimativa das propriedades mecânicas dos tratamentos em função do  $V_{LL}$  (Tabela 34 – Anexos), houve algumas regressões significativas. Para a estimativa do módulo de elasticidade ( $E_m$ ), T1, T2 e T7 apresentaram modelos que explicaram 34,7%, 44,1% e 94,8%, da variação de seus dados, respectivamente. Finalizando, para a estimativa da resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ), o  $V_{LL}$  estimou 67,9% da variação dos dados do T5 e 66,1% do T7.

Na Figura 41, são apresentados os modelos gerados para a estimativa das propriedades mecânicas em função do coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ). Foi observado que, de forma geral, as análises de todos os tratamentos em conjunto foram significativas ao nível de 1%. Verifica-se que o  $C_{LL}$  explicou 82,3% da variação dos dados do módulo de ruptura ( $f_m$ ), 72,6% da variação dos dados do módulo de elasticidade ( $E_m$ ), 92,1% da variação dos dados de resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ) e, 55,7% da variação dos dados de resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ).

Observado os modelos obtidos para a estimativa das propriedades mecânicas para cada tratamento (Tabela 35 – Anexos), houve algumas regressões significativas. Para a estimativa do módulo de elasticidade ( $E_m$ ), T3 e T6 apresentaram modelos que explicaram 37,6% e 78,2%, da variação de seus dados, respectivamente. Finalizando, para a estimativa da resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ), o  $V_{LL}$  estimou 75% da variação dos dados do T7.



**Figura 40.** Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função da velocidade de propagação da onda do ultrassom ( $V_{LL}$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ).



**Figura 41.** Análises de regressão linear para a predição das propriedades mecânicas em função do Coeficiente de rigidez ( $CLL$ ). A) módulo de ruptura ( $f_m$ ); B) módulo de elasticidade ( $E_m$ ); C) resistência à compressão paralela ( $f_{c,0}$ ); D) resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,0}$ ).



Apesar dos modelos terem sido significativos vale ressaltar que eles foram gerados considerando todos os tratamentos. Desta forma, pode-se inferir que a análise não-destrutiva é viável para prever propriedades mecânicas de painéis LVL. Entretanto, os modelos gerados para cada tratamento nem sempre foram satisfatórios e a principal justificativa para tal comportamento, provavelmente, se deve a baixa variabilidade nas propriedades mecânicas das espécies empregadas na confecção de cada painel ou ao pequeno número de amostras utilizadas.

#### 4.5. Avaliação das combinações sugeridas pela análise de variáveis canônicas

A fim de avaliar se o agrupamento das espécies, sugerido pela análise de variáveis canônicas (AVC) no capítulo 1, refletiram nos resultados das propriedades avaliadas no capítulo 2, foi realizada uma nova análise multivariada. A combinação linear das dezesseis variáveis estudadas ( $SW_P$ ,  $E_{dswp}$ ,  $V_{LL}$ ,  $C_{LL}$ ,  $f_m$ ,  $E_m$ ,  $f_{c,0}$ ,  $f_{gv,0}$ ,  $\rho_P$ , ABS2h, ABS24h, ABS96h, IE2h, IE24h, IE96h e TNRE) forneceu um cenário (Figura 42) que nos possibilita discriminar os grupos formados pelos tratamentos estipulados. Desta forma, foi possível analisar a similaridade ou dissimilaridade dos tratamentos de acordo com o este conjunto de dados.

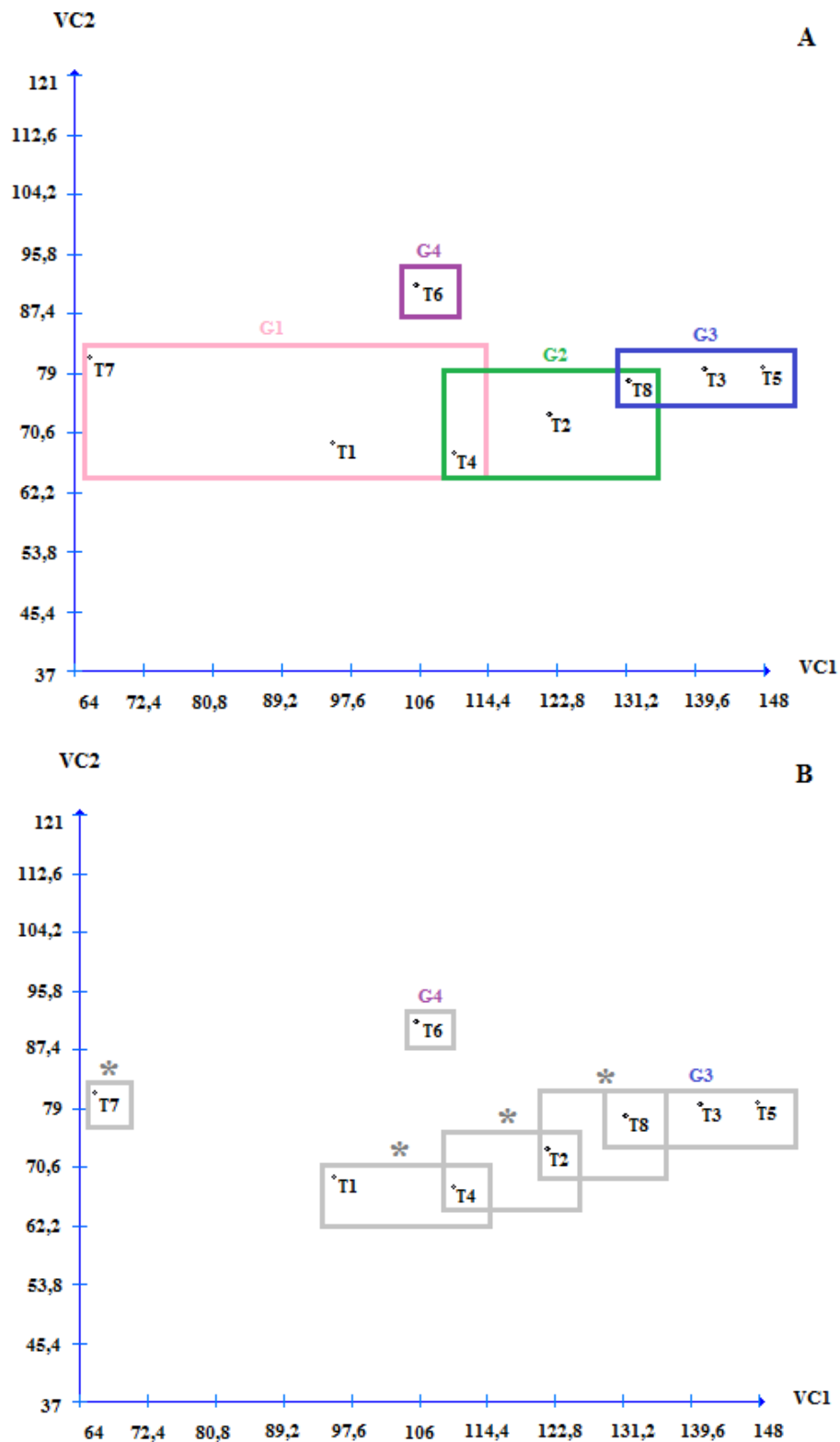
Na Tabela 37 (anexos) são apresentados as estimativas dos autovalores, as percentagens das variâncias acumuladas e os autovetores (coeficientes de ponderação) associadas a cada uma das variáveis canônicas estimadas, obtidos a partir da matriz de correlação entre as características em estudo. Verifica-se que as duas primeiras variáveis canônicas conseguiram explicar aproximadamente 93% da variação total, sendo, a VC1 (eixo “x”) responsável por 86% da variação e a VC2 (eixo “y”) por 7%. Portanto, estas são suficientes para estudar as diferentes combinações estabelecidas bidimensionalmente na Figura 42A. Esta figura apresenta a dispersão gráfica dos oito tratamentos com base nos escores das duas primeiras variáveis canônicas.

O agrupamento esperado dos tratamentos (Figura 42A) não refletiu de forma completa o agrupamento das espécies gerado no capítulo 1 (Figura 21). Nota-se visualmente que o G3 (azul T3  $\approx$  T5  $\approx$  T8) permanece, apresentando seus tratamentos certa proximidade, o que indica tendência de similaridade. Outro grupo que continua, unitário e isolado, é o G4 (roxo), demonstrando que o painel confeccionado com lâminas de curupixá apresenta propriedades distintas dos demais tratamentos. Em contraste com esses dois grupos, encontram-se o G1 (T1  $\approx$  T4  $\approx$  T7) e o G2 (T2  $\approx$  T4  $\approx$  T8).

Os tratamentos do G1 (T1, T4 e T7) se distanciam entre si no gráfico de dispersão demonstrando certa dissimilaridade entre suas propriedades, dificultando a sua perceptividade de grupo estabelecida no agrupamento das espécies. É visto que o T7 se afasta de T1 e T4, sugerindo ser um grupo isolado, com propriedades únicas. Com base neste fato foi criado um gráfico de dispersão dos grupos “encontrados” (Figura 42B), onde novas visualizações de agrupamentos são sugeridas. Desta forma, percebe-se que o G1, após ter sido ensaiado não-destrutiva, física e mecanicamente, separa seus tratamentos em dois grupos de acordo com seu grau de similaridade; nota-se o T7 afastado e o T1 mais próximo do T4, configurando um novo grupo.

Em seguida, ao analisar o G2, constata-se que este sofreu processo de separação e formação de novos grupos, assim como o G1. Esperava-se que T2, T4 e T8, fossem ficar mais próximos configurando o G1. Entretanto, estes apresentaram certa distância e de tal modo a perceber a tendência de T4 e T2 formarem um grupo assim como T2 e T8, configurando a divisão do G2 em dois novos grupos.

De forma geral, com esta análise pode-se verificar que o agrupamento das espécies sugerido no capítulo 1, que também determinou a conformação dos tratamentos, reflete no agrupamento do G3 e do G4. Contudo não é completamente eficiente na percepção do G1 e do G2.



**Figura 42.** Dispersão dos escores dos oito tratamentos em relação às duas primeiras variáveis canônicas (VC1 e VC2), tendo como base as dezesseis propriedades estudadas. A) agrupamento esperado; B) agrupamento encontrado. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk. \* novos grupos visualizados.

## 5. CONCLUSÕES

- De forma geral, o agrupamento das espécies sugerido pela primeira análise de variáveis canônicas pode ser percebido no agrupamento dos tratamentos para o G3 e para o G4.
- O G1 e o G2 apresentaram dissimilaridades e geraram quatro novos grupos.
- No agrupamento por tratamento, T7 configurou um novo grupo, isolado, com características únicas.
- A utilização da avaliação não-destrutiva foi eficiente para predizer as propriedades mecânicas dos painéis LVL confeccionados, desde que considerados todos os tratamentos.
- Nas propriedades mecânicas o G3 apresentou os melhores resultados. Assim como nas propriedades físicas.
- Os painéis confeccionados, caso produzidos em nível industrial, trariam um ganho no aproveitamento da tora e aumentariam as possibilidades de exploração de mais espécies madeireiras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMCI. Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. PNQM – **Programa Nacional de Qualidade da Madeira**. 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projetos de estruturas de madeira. **NBR 7190**. Rio de Janeiro, 107p. 1997.

AHMED, S. A.; CHUN, S. K. Permeability of *Tectona grandis* L. as affected by wood structure. **Wood Science and Technology**. v.45, p. 487-500. 2011.

ALENCAR, J. C. Estudos silviculturais de uma população natural de *Copaifera multijuga* Hayne – Leguminosae, na Amazônia Central – Produção de óleo-resina. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 12, n.1. 1982.

ALONSO, O. **Tratado de fitomedicina**. Isis Editorial, Buenos Aires. 175 p. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM D 198. **Annual book of ASTM standards**, v. 3.01. ASTM, West Conshohocken, PA. 1999a.

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

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. ASTM D2395. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken. 2010.

AMORIM, M. R. S.; DEL MENEZZI, C. H. S. Resistência da adesão de três espécies de madeira amazônica com painéis MDF e OSB com vista à produção de vigas estruturais. **Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia**. Departamento de Engenharia Florestal, **Universidade de Brasília**. 2010.

AMORIM, M. R. S.; RIBEIRO, P. G.; MARTINS, S. A.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Surface wettability and roughness of 11 Amazonian Tropical Hardwoods. **Floresta e Ambiente**. Disponível on-line ISSN 2179-8087. 2013.

ARRUDA, L. M.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; MELO, R. R. Estudo preliminar das propriedades de compensados produzidos com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) modificadas termomecânicamente. **Ciência da Madeira**, Pelotas. v. 2, . 01, p. 29-42. 2011.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S. Effect of thermomechanical treatment on physical properties of wood veneers. **International Wood Products Journal**. Disponível on line: DOI 10.1179/2042645312Y.0000000022. 2013.

ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. 3<sup>rd</sup> ed. PWS Publishing Company, Boston. 1994.

AVENT, R. R. **Adhesives**. In: Wood Engineering and Construction Handbook. 3<sup>rd</sup> edition. 1999.

AYARKA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y.; ANDO, K. Effect of glue type on flexural and tensile properties of finger-jointed tropical african hardwoods. **Forest Products Journal**. v.50, n.10, p. 59-68. 2010.

AYDIN, I.; COLAK, S.; ÇOLAKOĞLU, G.; SALIH, E. A comparative study on some physical and mechanics properties of LVL produced from Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. Veneers. **Holz Roh Werkst**, 62, p. 218-220. 2004.

BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Determinação do Módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal. v. 25, n.1, p. 19-28. 2005.

BALLONI, C. J. V. Caracterização física e química da madeira de *Pinus elliottii*. **Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia**. UNESP, Itapeva. 41p. 2009.

BARBOSA, A. P.; VIANEZ, B. F.; VAREJÃO, M. J.; ABREU, R. L. S. Considerações sobre o perfil tecnológico do setor madeireiro na Amazônia Central.

Biodiversidade, pesquisa e desenvolvimento na Amazônia. **Parcerias Estratégicas**, n.12, Setembro. 2001.

BARRETO, C. C. K.; PASTORE, T. C. M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. **Ciência Florestal**, v. 19, n.1, p. 23-30. 2009.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J. ROCHA, M. P. Proposta de programa de secagem para a madeira de “Guajará” (*Micropholis venulosa*), Sapotaceae. **Ciência da Madeira**, Pelotas – RS, v. 03, n. 01, p. 22-32. 2012.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2th ed. New York: Van Nostrand Reinhold, USA. 1992.

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

BORTOLETTO JÚNIOR, G.; BELINI, U. L. Produção de lâminas e manufatura de compensados a partir da madeira de Guapuruvu (*Schizolobium parayba* Blake.) provenientes de um plantio misto de espécies nativas. **Cerne**, v. 8, n.2, p. 001-016. 2002.

BORTOLETTO, G. J. Estudo Comparativo das propriedades físicas e mecânicas da madeira e do LVL de *Pinus merkusii*. **Revista Florestal Venezuelana**. v. 53, n.2, p. 191-195. 2009.

BRISOLARI, A. Estudo da molhabilidade em madeiras tropicais ou de reflorestamento por medidas de ângulo de contato e de permeabilidade. Dissertação - **Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais**. UFSC, São Carlos. 99p. 2008.

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2ª ed. Basileia: Birkhauser. 393p. 2006.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomida da madeira**. São Paulo, 154p. 1991.

BUYUKSARI, U.; AKBULUT, T.; GULER, C.; AS, N. 2011. Wettability and surface roughness of natural and plantation-grown narrow-leaved ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) wood. **Bioresouces** v. 6, n. 4, p. 4721-4730. 2011.

CANDAN, Z.; HIZIROGLU, S.; MCDONALD, A. G. Surface quality of thermally compressed *Douglas fir* veneer. **Materials and Design**. v.31, p. 3574-3577. 2010.

CARVALHO, L. Caracterisation Physico-Chimique de la Surface du Chêne Pedonculé. Diplome d'Études Approfondies Sciences du Bois, ESSTIB – **Université de Nancy I**. 1990.

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

CHEN, C. M. Effect of extractive removal on adhesion and wettability of some tropical woods. **Forest Products Journal**. v. 20, n.1, p. 36-41. 1970.

CHRISTIANSEN, A.W. How overdrying wood reduces its bonding to phenolformaldehyde adhesives: A critical review of the literature. Part I. Physical responses. **Wood and Fiber Science**. v. 22, n. 4, p. 441-459. 1990.

CLEMENT, C.R.; HIGUCHI, N. A floresta amazônica e o futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**. v. 58, n. 3, p. 44-49. 2006.

CORRÊA, A. Z. Essências papeleiras de reflorestamento – madeiras nativas da Amazônia. **Acta Amazônica**. v. 15, n.3/4, p. 371-402. 1985.

COSTA, A. D. C. Anatomia da madeira em Sapotaceae. Tese - **Doutorado em Ciências – USP**, Instituto de Biociências. 95p. 2006.

CRUZ, C. D. **Programa GENES**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 442 p. 1997.

CRUZ, M. M. S. Estudo da molhabilidade da madeira de pinho pela resina ureia-formaldeído. **Dissertação - Mestrado. Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa**. Portugal. 200p. 2006.

CUNHA, A.B.; MATOS, J.L.M. Determinação do Módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“*stress wave timer*”). **Revista Árvore**. v. 34, n. 2, p. 345-354. 2010.

ÇOLAK, S.; AYDIN, I.; DEMIRKIR, C.; ÇOLAKOĞLU, G. Some technological properties of laminated veneer lumber manufactured from Pine (*Pinus sylvestris* L.) veneers



with melanine added – UF resins. **Turkish Journal of Agriculture & Forestry**. v. 28, p. 109-113. 2004.

DAOUI, A.; DESCAMPS, C.; MARCHAL, R.; ZERIZER, A. Influence of veneer quality on beech LVL mechanical properties. **Maderas Ciencia y tecnologia**. v. 13, n. 1, p. 69-83. 2011.

DEL MENEZZI, C.H. S. Instabilidade dimensional da Madeira e de seus subprodutos: causas, consecuencias e prevenção. **Técnicas Florestais, Universidade de Brasília**. v.8, n.2. 37p. 2006.

DEL MENEZZI, C.H.S.; MENDES, L.F.; SOUZA, M.R.; BORTOLETTO JUNIOR, G. Effect of nondestructive evaluation of veneers on the properties of laminated veneer lumber (LVL) from a tropical species. **Forests**. v. 4, p. 270-278. 2013.

DUNDAR, T.; AYRILMIS, N.; CANDAN, Z. Evaluation of surface roughness of laminated veneer lumber (LVL) made from beech veneers treated with various fire retardants and dried at different temperatures. **Forest Products Journal**. v.58, n.1/2, p. 71-76. 2008.

EHRMAN, T. Determination of Acid-Soluble Lignin in Biomass. **ASTM-Methods Chemical Analysis and Testing Task Laboratory Analytical Procedure – LAP-004**, 7p. 1996.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION - APA. Engineered Wood Systems. **Understanding Engineered Wood Products**. 2010. Disponível em: <[hwww.apawood.org/woodu](http://www.apawood.org/woodu)> Acessado em: Julho de 2011.

FERRAZ, C.; MOTTA, R. S. Concessões Florestais e Exploração Madeireira no Brasil. Condicionantes para a Sustentabilidade. **Programa Nacional de Florestas - PNF**. 2002.

FONSELIUS, M. Effect of size on the bending strength of laminated veneer lumber. **Wood Science and Technology**. v. 31, p. 399-413. 1997.

FREEMAN, H. A. Properties of Wood and adhesion. **Forest Products Journal**. v. 9, n. 12. p. 451-458. 1959.

GABRIEL, M. S. C. Desempenho físico-mecânico de painéis LVLs de Pinus Tropicais da região de São Paulo. **Tese Doutorado em Agronomia. UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas.** 170p. 2007.

GARDNER, D. J.; GENERALA, N. C.; GUNNELLS, D. W.; WOLCOTT, M. P. Dynamic Wettability of wood. **Langmuir**, v.7, p. 2498-2502. 1991.

GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. Estimativas das constants elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultrassom). **Cerne**, Lavras. v. 7, n.2, p. 81-92. 2001.

GONÇALVES. R. **Ultrassom em aplicações visando a caracterização de materiais: aspectos teóricos.** Unicamp – Laboratório de ensaios não-destrutivos. 77p. 2011.

GRAY, V. R. The wettability of Wood. **Forest Products Journal**. p. 452-461. 1962.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Processing roughness of sanded wood surfaces.**Holz Roh Werkest**. v. 63, p. 43-52. 2005.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Separation of processing roughness from anatomical irregularities and fuzziness to evaluate the effect of grit size on sanded European oak. **Forest Products Journal**. v. 57, n. 1/2, p. 110-115. 2007.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest products and wood science: an introduction.** 3ª ed, 484p. 1996.

H'NG, P.S.; PARIDAH, M.T.; CHIN, K.L. Bending properties of laminated veneer lumber produced from Keruing (*Dipterocarpus sp.*) reinforced with low density wood species. **Asian Journal of Scientific Research**. v.3, n.2, p. 118-125. 2010.

HSE, C.Y.; KUO, M. Influence of extractives on wood gluing and finishing – A review. **Forest Product Journal**. v. 38, n. 1, p. 52-56. 1988.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira: Uso Sustentável na Construção Civil.** 2ª ed. 99 p. 2009.

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

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G.; TORQUATO, L. P.; BRONOSKI, M.; NISHIDATE, M. M. Produção de painéis laminados unidirecionais-LVL com madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunii* Maiden. **Revista Floresta e Ambiente**. v. 15, n. 2, p. 01-07. 2008.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PINTO, J. A.; VIANA, L. C.; SOUZA, M. S.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Produção de painéis laminados unidirecionais – LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne, Lavras**, v. 16, n. 4, p. 557-563. 2010.

IWAKIRI, S. Laminação de Madeiras. Disponível em: <[www.madeira.ufpr.br/disciplinassetsuo/2.ppt](http://www.madeira.ufpr.br/disciplinassetsuo/2.ppt)>. Acessado em: 27 Jan. 2013.

JIS – JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. Geometrical Products Specifications (GPS) – Surface texture: profile method – Terms, definitions and surface texture parameters. JIS B 0601. Tokyo, 2001.

JOLY, A. B. Botânica – Introdução à taxonomia vegetal. 13ed, São Paulo – SP, 777p. 2002.

KAMALA, B. S.; KUMAN, P.; RAO, R. V.; SHARMAN, S. N. Performance test of LVL from rubber wood for different physical and mechanical properties. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 57, p. 114-116. 1999.

KANTAY, R.; AKBULUT, T.; KORKUT, S. The effect of peeling temperature on surface roughness in peeled beech veneer production. **Review of the Forestry of Faculty, University of Istanbul**. n. 53, v. 2, p. 1-11. 2003.

KILLIC, Y.; COLAK, M.; BAYSAL, E.; BURDULU, E. An investigation of some physical and mechanical properties of LVL manufactured from *Alnus glutinosa* glued with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives. **Forest Products Journal**. v.56, n.9, p. 56-59. 2006.

KLEMAREWSKI, A. LVL from machine graded *Eucalyptus nitens* and *Radiata pine* veneer. **Concepción: INFOR**. Cap. 3, p.33-52. 2007.

KORKUT, S.; AKGÜL, M. Effect of drying temperature on surface roughness of oak (*Quercus petraea* ssp. *Iberica* (Steven ex Bieb) Krassiln) Veneer. **Building and environment** v. 42, p. 1931-1935. 2007.

LAM, F. Modern Structural Wood products. **Progress in Structural Engineering and Materials**. v. 3, p. 238-245. 2001.

LEMASTER, R. L.; TAYLOR, J. B. High speed surface assessment of wood and wood-based composites. In: Proceedings of the 14<sup>th</sup> wood machining seminar. France. p. 479-488. 1999.

LI, X. M.; REINHOUDT, D.; GREGO-CALAMA, M. What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces. **Chemical Society Reviews**. v. 36, p. 1350-1368. 2007.

LIMA, N. N.; CUNHA, U. S.; LUCAS FILHO, F. C.; BARBOSA FILHO, J. Influência da gramatura da resistência da linha de cola aos esforços de cisalhamento em painéis compensados de *Copaifera duckei* Dawyer e *Eperua oleifera* Ducke. **Acta Amazonica**. v. 41, n.1, p. 83-90. 2011.

LOBÃO, M. S.; GOMES, A. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferente planos e densidades. Nota técnica. **Cerne**, Lavras, v.12, n. 2, p. 194-200. 2006.

LOPES, M. C.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D. L. G.; MENEZES, L. F. Agrupamento de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis* em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.14, n.2, p. 133-144. 2004.

LOUREIRO, A. A.; FREITAS, J. A.; RAMOS, K. B. L.; FREITAS, C. A. A. Essências Madeireiras da Amazônia. Volume 4. Manaus: MCT/INPA-CPPF. 191p. 2000.

LUTZ, J. F. Wood Veneer – Log selection, cutting and drying. **USDA Technical bulletin**, n. 1577. 1978.

MAINIERI, C. & CHIMELO, J. P. Fichas de características das madeiras brasileiras. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT** - São Paulo. 420 p. 1989.

MALKOÇOĞLU, A. Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions. **Building and Environment**. n. 42, p. 2562-2567. 2007.

MELO, R. R. Avaliação de variáveis tecnológicas na produção de painéis LVL confeccionados com paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). **Tese de Doutorado – UnB**, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal. 164p. 2012.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R.; STANGERLIN, D. M. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**. Disponível on line: <<http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.004>>. 2013.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B.; CECCANTINI, G. Caracterização anatômica macroscópica das madeiras utilizadas para laminação na região de Curitiba – PR. **Scientia Agraria**. v. 4, n. 1, p. 33-38. 2003.

NUGROHO, N.; ANDO, N. Development of structural composite products made from bamboo II: fundamental properties of laminated bamboo lumber. **Journal of wood science**. v. 47, p. 237-242. 2001.

OLIVEIRA, I. R.; BOTARO, V. R.; ALMEIDA, M. A.; LONGUI, E. L.; LIMA, I. L.; FLORSHEIM, S. M. B.; ZANATTO, A. C. S. Chemical characterization of *Handroanthus vellosi* **Wood. Rev. Inst. Flor.** v.24, n.1, p. 67-73. 2012.

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

ÖZÇİFÇİ, A.; YAPICI, F. Effects of machining method and grain orientation on the bonding strength of some Wood species. **Journal of Materials Processing Technology**. v.202. p. 353-358. 2008.

PAES, J.B.; MORAIS, V.M.; LIMA, C.R.; SANTOS, G.J.C. Resistência natural de nove madeiras do semiárido brasileiro a fungos xilófagos em simulares de campo. **Revista Árvore**. v.33, n.3, p.515-520, 2009.

- PAULA, J. E.; ALVES, J. L. H. **Madeiras Nativas**. Brasília. 543p. 1997.
- PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4<sup>th</sup> ed., New York. 1980.
- PEREIRA, A. P.; MELO, C. F. M.; ALVES, S. M. O paricá (*Schizolobium amazonicum*), características gerais da espécie e suas possibilidades de aproveitamento na indústria de celulose e papel. **Revista do Instituto Florestal**. v. 16, n. 2, p. 1340-1344.. 1982.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6<sup>a</sup> Edição. 223p. 2007.
- PIERI, F. A.; MUSSI, M. C.; MOREIRA, M. A. S. Óleo de copaíba (*Copaifera* sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**. Botucatu, v.11, n.4, p. 465-472. 2009.
- PIAO, C.; WINANDY, J. E.; SHUPE, T. F. From hydrophilicity to hydrophobicity: a critical review: Part I. Wettability and surface Behavior. **Wood and Fiber Science**. 42 (4), p. 490-510. 2010.
- PIO, N.S. Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Tese – Doutorado em Ciências Florestais, UFPR**. 168p. 2002.
- RECORD, S. J.; HESS, R. **Timbers of the new world**. Arno Press, New York. 642 p. 1972.
- ROSA, L. S. Características Botânicas, anatômicas e tecnológicas do Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huberr ex Ducke). **Revista de Ciências Agrárias**, Belém. n. 46, p. 63-79. 2006.
- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures – A review**. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 40p. 1994.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**. v. 48, n.1, p. 101-105. 1998.
- ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. USA. 2005.

SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. Manejo Florestal Empresarial na Amazônia Brasileira – Restrições e Oportunidades. **Relatório Síntese CIFOR (Center for International Forestry Research)**. Belém, 74p. 2006.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon Forest Wood species. **Holzforschung**. v. 61, p. 469-477. 2007.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: Seru (*Allantoma lineata*) e Marupá (*Simarouba amara*). **Floresta**, Curitiba – PR. v. 40, n. 2, p. 345-354. 2009.

SELLERS. T. **Plywood and adhesive technology, Forest Products Utilization**. Mississippi, USA. 661p. 1985.

SERNEK, M. Comparative Analysis of inactivated wood surfaces. **Dissertation for the degree of doctor - Virginia Polytechnic Institute and State University, USA**. 193p. 2002.

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Banco de dados de espécies de madeiras brasileiras** – LPF (Laboratório de Produtos Florestais). Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira>> Acessado em: 2012 e Mar, Abr e Mai de 2013.

SHI, S. Q.; GARDNER, D. J. Dynamic adhesive wettability of wood. **Wood and Science Fiber**. v. 33, n. 1, p. 55-68. 2001.

SHIMOYAMA, V. R. S.; MATOS, J. L. M. Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* por meio do método não destrutivo: emissão de onda de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal – **Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor. UFPR**, Curitiba. 151p. 2005.

SHUKLA, C.A.; KAMDEN, D.P. Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: effect of the pressure duration. **European Journal of wood and wood products**. n.66, p. 119-127. 2008.

SHUPE T. F.; HSE C.Y.; GROOM, L. H.; CHOONG, E. T. Effect of silvicultural practice and veneer grade lay-up on some mechanical properties of loblolly pine LVL. **Forest Products Journal**. v. 47, n. 9, p. 63-69. 1997.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; XAVIER, B. A.; CASTRO, V. R. Variação da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Revista Árvore**. v.30, n.5, p. 803-810. 2006.

SOUZA, M. R.; TEIXEIRA, D. E. **Compostos à base de madeira**. Laboratório de Produtos Florestais – LPF. 2002.

SOUZA, F.; DEL MENEZZI, C. H. S. Material properties and nondestructive evaluation of LVL made from *Pinus oocarpa* and *P. kesiya*. **European Journal of Wood and Wood Products**. v. 69, p. 183-192. 2011.

STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; MELO, R.R. Uso do ultrassom para estimative das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas. v. 01, n. 02, p. 44-53. 2010.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials. Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials. **USDA – Wood Handbook**. Chapter 11. 2010.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using Multivariate statistics**. 5<sup>a</sup> ed. USA. 2007.

TAPPI Standard. **T204. om-88**, Solvent extractives of wood and pulp. 1996.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do modulo de elasticidade da Madeira com uso de método não destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal – SP. v. 25, n. 2, p. 291-299. 2005.

TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a Wood sanding operation. **Forest Products Journal**, v. 9, n.5, p. 41-46. 1999.

TEMPLETON, D.; EHRMAN, T. Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass. **ASTM-Chemical Analysis and Testing Task Laboratoty Analytical Procedure Methods**. LAP-003, 14 p. 1995.



TILLOTSON, N. E. **U.S. patent** 2. 379-389. 1945.

TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultrassom na madeira. **Revista Árvore**. v. 33, n.1, p. 177-184. 2009.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n.1. p. 01-015. 1996.

TSOUMIS, G. T. **Wood as raw material**. 1ª Ed. Londres. 276p. 1968.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Madison, Forest Products Laboratory. 463p. 2010.

VEIGA JUNIOR, V. F.; PINTO, A. O gênero *Copaifera* L. **Química Nova**. v. 25, n. 2, 273-286. 2002.

VIDAURRE, G. B. Caracterização anatômica, química e físico-mecânica de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) para a produção de energia e polpa celulósica. **Tese de Doutorado – UFV** (Universidade Federal de Viçosa). 89p. 2010.

ZANGIÁCOMO, A. L. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Dissertação de Mestrado – USP** (Universidade de São Paulo). 81p. 2003.

WALINDER, M. Wetting phenomena on wood: factors influencing measurements of wood wettability. **Doctoral Thesis, KTH – Royal Institute of Technology**, Stockholm. 2000.

WALINDER, M. Study of Lewis Acid-Base Properties of Wood by Contact Angle Analysis. **Holzforschung**. v. 56, n4, p. 363 - 371. 2002.

WALKER, J. F. C. Characteristics of stemwood and their manipulation. In: Primary wood processing: principles and practice. London, p. 153-196. 1993.

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

## ANEXOS

### A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 1

**Tabela 12.** Estatística descritiva das propriedades das lâminas.

Propriedade	Espécie	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
Densidade $\rho$	Amescla	25	0,46	0,03
	Copaíba	23	0,65	0,04
	Curupixá	25	0,50	0,03
	Paricá	23	0,29	0,04
	Visgueiro	22	0,58	0,02
Rugosidade $R_a$ SF	Amescla	25	10,50	1,61
	Copaíba	25	10,64	2,81
	Curupixá	23	11,02	1,82
	Paricá	23	12,44	1,27
	Visgueiro	25	9,53	2,94
Rugosidade $R_a$ CF	Amescla	25	12,45	2,35
	Copaíba	25	11,48	3,67
	Curupixá	23	15,05	1,19
	Paricá	23	12,33	3,10
	Visgueiro	25	12,31	3,63
Molhabilidade $\Delta\theta$ SF	Amescla	21	35,99	15,49
	Copaíba	13	40,55	13,06
	Curupixá	11	8,99	7,64
	Paricá	15	38,02	17,34
	Visgueiro	22	59,58	22,87
Molhabilidade $\Delta\theta$ CF	Amescla	21	32,49	7,07
	Copaíba	13	44,29	3,72
	Curupixá	11	11,02	4,79
	Paricá	15	40,37	16,17
	Visgueiro	22	49,29	22,49
Retratibilidade $R_v$	Amescla	13	5,88	0,62
	Copaíba	14	11,27	3,27
	Curupixá	14	6,28	1,04
	Paricá	13	4,70	0,81
	Visgueiro	14	6,30	1,02
Análise Química ET	Amescla	3	2,44	0,15
	Copaíba	3	2,87	0,06
	Curupixá	3	2,85	0,37
	Paricá	3	4,08	0,13
	Visgueiro	3	3,15	0,21
Análise Química LigT	Amescla	3	28,69	0,26
	Copaíba	3	24,95	0,04
	Curupixá	3	25,56	0,02
	Paricá	3	27,71	0,74
	Visgueiro	3	29,01	0,93
Análise Química Holo	Amescla	3	68,87	0,13
	Copaíba	3	72,18	0,04
	Curupixá	3	71,59	0,37
	Paricá	3	68,21	0,61
	Visgueiro	3	67,84	1,05

**Tabela 13.** Análise de variância para o efeito da espécie nas propriedades estudadas.

Propriedade	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
Densidade $\rho$	Entre Grupos	1,681	4	0,420	470,539	0,000*
	Dentro dos grupos	0,101	113	0,001		
	Total	1,782	117			
Rugosidade $R_aSF$	Entre Grupos	105,947	4	26,487	5,418	0,000*
	Dentro dos grupos	567,097	116	4,889		
	Total	673,044	120			
Rugosidade $R_aCF$	Entre Grupos	173,143	4	43,286	4,952	0,001*
	Dentro dos grupos	1014,026	116	8,742		
	Total	1187,169	120			
Molhabilidade $\Delta\theta SF$	Entre Grupos	19405,713	4	4851,428	16,511	0,000*
	Dentro dos grupos	22625,174	77	293,833		
	Total	42030,886	81			
Molhabilidade $\Delta\theta CF$	Entre Grupos	12024,159	4	3006,040	14,761	0,000*
	Dentro dos grupos	15680,784	77	203,647		
	Total	27704,943	81			
Retratibilidade $R_v$	Entre Grupos	353,875	4	88,469	31,070	0,000*
	Dentro dos grupos	179,384	63	2,847		
	Total	533,259	67			
Química ET	Entre Grupos	4,564	4	1,141	25,757	0,000*
	Dentro dos grupos	0,443	10	0,044		
	Total	5,007	14			
Química LigT	Entre Grupos	40,437	4	10,109	34,001	0,000*
	Dentro dos grupos	2,973	10	0,297		
	Total	43,410	14			
Química Holo	Entre Grupos	48,295	4	12,074	37,106	0,000*
	Dentro dos grupos	3,254	10	0,325		
	Total	51,549	14			

**Tabela 14.** Análise de variância para o efeito da superfície na Rugosidade – sem fendas ( $R_a$ SF) e com fendas ( $R_a$ CF) – das espécies estudadas.

Espécie	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
Amescla	Entre Grupos	36,694	1	36,694	10,430	0,002*
	Dentro dos grupos	165,350	47	3,518		
	Total	202,044	48			
Copaíba	Entre Grupos	8,812	1	8,812	0,826	0,368 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	512,289	48	10,673		
	Total	521,100	49			
Curupixá	Entre Grupos	145,897	1	145,897	41,299	0,000*
	Dentro dos grupos	169,569	48	3,533		
	Total	315,466	49			
Paricá	Entre Grupos	,930	1	,930	,230	0,634 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	185,847	46	4,040		
	Total	186,776	47			
Visgueiro	Entre Grupos	96,438	1	96,438	8,837	0,005 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	523,828	48	10,913		
	Total	620,266	49			

**Tabela 15.** Análise de variância para o efeito da superfície na Molhabilidade – sem fendas ( $\Delta\Theta$ SF) e com fendas ( $\Delta\Theta$ CF) – das espécies estudadas.

Espécie	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
Amescla	Entre Grupos	4,518	1	4,518	0,039	0,844 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	4580,825	40	114,521		
	Total	4585,343	41			
Copaíba	Entre Grupos	28,275	1	28,275	0,270	0,607 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	3141,083	30	104,703		
	Total	3169,358	31			
Curupixá	Entre Grupos	22,706	1	22,706	0,558	0,464 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	813,909	20	40,695		
	Total	836,615	21			
Paricá	Entre Grupos	41,348	1	41,348	0,147	0,704 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	7871,775	28	281,135		
	Total	7913,124	29			
Visgueiro	Entre Grupos	1162,668	1	1162,668	2,260	0,140 <sup>NS</sup>
	Dentro dos grupos	21611,187	42	514,552		
	Total	22773,855	43			

**Tabela 16.** Correlações entre a densidade aparente ( $\rho$  - g/cm<sup>3</sup>) e a rugosidade das espécies estudadas.

Espécie	$R_{aSF}$	$R_{aCF}$
Amescla	-0,009 <sup>NS</sup>	-0,353 <sup>NS</sup>
Copaíba	-0,110 <sup>NS</sup>	-0,147 <sup>NS</sup>
Curupixá	-0,074 <sup>NS</sup>	-0,143 <sup>NS</sup>
Paricá	0,049 <sup>NS</sup>	-0,261 <sup>NS</sup>
Visgueiro	0,073 <sup>NS</sup>	0,142 <sup>NS</sup>

$\rho$  = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);  $R_{aSF}$  = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, sem fendas, em  $\mu\text{m}$ ;  $R_{aCF}$  = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, com fendas, em  $\mu\text{m}$ ; <sup>NS</sup> não significativo ao nível de 5%.

**Tabela 17.** Correlações entre a molhabilidade e a rugosidade da face superior, sem fendas.

Espécie	$\Delta\theta_{SF} \times R_{aSF}$
Amescla	0,069 <sup>NS</sup>
Copaíba	-0,369 <sup>NS</sup>
Curupixá	0,393 <sup>NS</sup>
Paricá	0,121 <sup>NS</sup>
Visgueiro	0,210 <sup>NS</sup>

$\Delta\theta_{SF}$  = diferença do ângulo de contato inicial e final, após 10 segundos, da superfície superior, sem fendas, em graus;  $R_{aSF}$  = média aritmética dos desvios do perfil da linha média, sem fendas, em  $\mu\text{m}$ ; <sup>NS</sup> não significativo ao nível de 5%;

## B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 2

**Tabela 18.** Estatística descritiva da densidade ( $\rho_{LVL}$ ) dos painéis LVLs.

Tratamento	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
T1	15	0,50	0,01
T2	18	0,64	0,01
T3	18	0,72	0,01
T4	5	0,56	0,00
T5	6	0,75	0,01
T6	6	0,60	0,01
T7	6	0,36	0,01
T8	6	0,70	0,01

**Tabela 19.** Estatística descritiva da absorção de água (ABS %) dos painéis LVLs.

Período de Imersão (h)	Tratamento	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
ABS 2h	T1	6	19,35	1,64
	T2	6	21,66	1,03
	T3	6	17,94	0,76
	T4	6	11,44	1,05
	T5	6	12,78	1,80
	T6	6	35,34	3,72
	T7	6	41,16	3,69
	T8	6	25,22	1,12
ABS 24h	T1	6	39,60	1,91
	T2	6	36,89	1,82
	T3	6	36,08	1,15
	T4	6	27,14	1,59
	T5	6	30,35	3,24
	T6	6	64,41	2,89
	T7	6	74,95	3,57
	T8	6	39,70	1,36
ABS 96h	T1	6	58,87	2,84
	T2	6	52,41	2,97
	T3	6	51,06	1,34
	T4	6	42,01	2,14
	T5	6	46,80	2,36
	T6	6	75,72	2,54
	T7	6	113,07	5,91
	T8	6	55,39	1,67

**Tabela 20.** Estatística descritiva do inchamento em espessura (IE %) dos painéis LVLs.

Período de Imersão (h)	Tratamento	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
IE 2h	T1	5	1,97	0,12
	T2	6	1,81	0,12
	T3	5	1,77	0,15
	T4	6	1,61	0,17
	T5	6	1,87	0,15
	T6	3	2,89	0,06
	T7	5	2,33	0,03
	T8	5	1,86	0,12
IE 24h	T1	5	2,65	0,15
	T2	5	2,25	0,09
	T3	6	2,54	0,19
	T4	6	2,40	0,14
	T5	6	2,84	0,22
	T6	4	3,54	0,18
	T7	6	2,83	0,20
	T8	6	2,45	0,51
IE 96h	T1	5	2,77	0,16
	T2	5	2,38	0,08
	T3	6	2,74	0,23
	T4	6	2,63	0,12
	T5	5	3,23	0,09
	T6	3	3,63	0,07
	T7	6	2,95	0,16
	T8	5	2,32	0,14

**Tabela 21.** Estatística descritiva da taxa de não-retorno em espessura (TNRE %) dos painéis LVLs.

Tratamento	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
T1	4	2,37	0,02
T2	6	1,77	0,20
T3	6	2,05	0,11
T4	6	2,08	0,11
T5	6	2,29	0,20
T6	5	2,32	0,23
T7	5	2,07	0,08
T8	5	1,59	0,15

**Tabela 22.** Análise de variância para o efeito do tratamento na densidade ( $\rho_{LVL}$ ) dos painéis.

Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
Entre Grupos	0,99	7	0,14	1494,75	0,000*
Dentro dos grupos	0,01	72	0,00		
Total	0,99	79			



**Tabela 23.** Análise de variância para o efeito do tratamento na Absorção de água (ABS).

Período de Imersão (h)	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
ABS 2h	Entre Grupos	4595,33	7	656,48	140,51	0,000*
	Dentro dos grupos	186,89	40	4,67		
	Total	4782,21	47			
ABS 24h	Entre Grupos	11969,89	7	1709,98	309,07	0,000*
	Dentro dos grupos	221,31	40	5,53		
	Total	12191,19	47			
ABS 96h	Entre Grupos	22155,60	7	3165,09	346,76	0,000*
	Dentro dos grupos	365,10	40	9,13		
	Total	22520,71	47			

**Tabela 24.** Valores médios da absorção de água (ABS %).

ABS	Período de imersão					
	2h**		24h**		96h**	
Tratamento	Média %	CV %	Média %	CV %	Média %	CV %
T1	19,35 d	8,5	39,60 c	4,8	58,87 c	4,8
T2	21,66 cd	4,8	36,89 c	4,9	52,41 d	5,7
T3	17,94 d	4,2	36,08 c	3,2	51,06 de	2,6
T4	11,44 e	9,2	27,14 d	5,9	42,01 f	5,1
T5	12,78 e	14,1	30,35 d	10,7	46,80 ef	5,0
T6	35,34 b	10,5	64,41 b	4,5	75,72 b	3,4
T7	41,16 a	9,0	74,95 a	4,8	113,07 a	5,2
T8	25,22 c	4,4	39,70 c	3,4	55,39 cd	3,0

\*\* significativo ao nível de 1%. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk.

**Tabela 25.** Análise de variância para o efeito do tratamento no Inchamento em Espessura (IE).

Período de Imersão (h)	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
IE 2h	Entre Grupos	4,36	7	0,62	36,93	0,000*
	Dentro dos grupos	0,56	33	0,02		
	Total	4,92	40			
IE 24h	Entre Grupos	5,10	7	0,73	11,86	0,000*
	Dentro dos grupos	2,21	36	0,06		
	Total	7,31	43			
IE 96h	Entre Grupos	5,39	7	0,77	35,58	0,000*
	Dentro dos grupos	0,71	33	0,02		
	Total	6,10	40			

**Tabela 26.** Valores médios de inchamento em espessura (IE %).

IE	Período de imersão					
	2h **		24h **		96h **	
Tratamento	Média %	CV %	Média %	CV %	Média %	CV %
T1	1,97 c	6,0	2,65 bc	5,6	2,77 cd	5,7
T2	1,81 cd	6,8	2,25 c	3,9	2,38 ef	3,5
T3	1,77 cd	8,6	2,54 bc	7,4	2,74 cd	8,5
T4	1,61 d	10,6	2,40 bc	6,0	2,63 de	4,4
T5	1,87 cd	8,2	2,84 b	7,6	3,23 b	2,7
T6	2,89 a	2,1	3,54 a	5,2	3,63 a	1,9
T7	2,33 b	1,3	2,83 b	7,0	2,95 bc	5,3
T8	1,86 cd	6,6	2,45 bc	20,6	2,52 f	6,2

\*\* significativo ao nível de 1%. **T1** – 3A/3Pa/3A; **T2** – 3Pk/3A/3Pk; **T3** – 3Co/3Pk/3Co; **T4** – 9A; **T5** – 9Co; **T6** – 9Cu; **T7** – 9Pa; **T8** – 9Pk.

**Tabela 27.** Análise de variância para o efeito do tratamento na Taxa de não-retorno em espessura (TNRE %).

Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
Entre Grupos	2,68	7	0,38	15,88	0,000*
Dentro dos grupos	0,84	35	0,02		
Total	3,52	42			

**Tabela 28.** Estatística descritiva das variáveis provenientes da avaliação não destrutiva.

Variável	Tratamento	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
SW <sub>v</sub>	T1	15	4355,38	65,95
	T2	18	4412,64	63,68
	T3	17	4556,60	57,94
	T4	6	4455,62	30,82
	T5	6	4556,49	80,51
	T6	6	4330,70	27,99
	T7	5	4264,92	22,71
	T8	6	4460,73	107,34
V <sub>LL</sub>	T1	18	5056,83	72,92
	T2	15	5088,25	34,67
	T3	18	5353,47	53,38
	T4	6	5126,26	29,21
	T5	6	5512,19	50,35
	T6	6	5179,08	42,56
	T7	6	4971,70	115,94
	T8	6	5379,47	73,85
E <sub>dsw</sub>	T1	18	5056,83	72,92
	T2	15	5088,25	34,67
	T3	18	5353,47	53,38
	T4	6	5126,26	29,21
	T5	6	5512,19	50,35
	T6	6	5179,08	42,56
	T7	6	4971,70	115,94
	T8	6	5379,47	73,85
C <sub>LL</sub>	T1	18	13157,84	646,95
	T2	14	17081,23	344,44
	T3	18	21150,31	537,70
	T4	6	14928,40	383,85
	T5	6	23363,62	597,32
	T6	6	16303,06	293,92
	T7	6	8977,90	539,80
	T8	6	20534,00	608,77

**Tabela 29.** Análise de variância para o efeito do tratamento nas variáveis provenientes da avaliação não destrutiva (AND).

Variável	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
SW <sub>v</sub>	Entre Grupos	660449,13	7	94349,88	23,56	0,000*
	Dentro dos Grupos	284289,27	71	4004,07		
	Total	944738,41	78			
E <sub>dsw</sub>	Entre Grupos	513760934,99	7	73394419,28	377,65	0,000*
	Dentro dos Grupos	13798428,45	71	194344,06		
	Total	527559363,43	78			
V <sub>LL</sub>	Entre Grupos	2103419,10	7	300488,44	79,44	0,000*
	Dentro dos Grupos	276121,76	73	3782,49		
	Total	2379540,86	80			
C <sub>LL</sub>	Entre Grupos	1308539379,55	7	186934197,08	678,55	0,000*
	Dentro dos Grupos	19835220,13	72	275489,17		
	Total	1328374599,68	79			

**Tabela 30.** Estatística descritiva das propriedades mecânicas.

Propriedade	Tratamento	Nº Repetições	Média	Desvio Padrão
$f_m$	T1	16	52,39	5,26
	T2	18	76,40	6,35
	T3	18	92,09	7,65
	T4	6	70,69	3,15
	T5	6	90,68	5,90
	T6	6	63,51	1,23
	T7	5	36,07	6,03
	T8	6	78,07	4,60
$E_m$	T1	16	8154,82	825,25
	T2	18	10439,46	629,56
	T3	14	12107,31	406,07
	T4	6	9771,88	387,12
	T5	6	12380,09	840,17
	T6	6	7679,24	488,83
	T7	4	4903,94	507,96
	T8	6	10082,25	1901,00
$f_{c,0}$	T1	18	31,03	1,46
	T2	17	41,11	1,40
	T3	18	48,90	2,00
	T4	6	37,41	0,97
	T5	6	51,69	1,10
	T6	4	36,57	0,35
	T7	6	19,80	1,55
	T8	6	43,26	1,59
$f_{gv,0}$	T1	4	2,52	0,85
	T2	6	5,55	0,53
	T3	6	5,33	1,51
	T4	6	5,45	1,02
	T5	6	7,89	0,75
	T6	6	5,01	0,63
	T7	5	2,70	0,48
	T8	6	5,18	0,62

**Tabela 31.** Análise de variância para o efeito do tratamento nas propriedades mecânicas.

Variável	Fonte da Variação	SQ	gl	QM	F	Sig.
$f_m$	Entre Grupos	22963,19	7	3280,46	92,87	0,000*
	Dentro dos Grupos	2578,47	73	35,32		
	Total	25541,66	80			
$E_m$	Entre Grupos	288430306,44	7	41204329,49	64,54	0,000*
	Dentro dos Grupos	43413686,19	68	638436,56		
	Total	331843992,64	75			
$f_{c,0}$	Entre Grupos	6294,83	7	899,26	382,26	0,000*
	Dentro dos Grupos	171,73	73	2,35		
	Total	6466,56	80			
$f_{gv,0}$	Entre Grupos	104,56	7	14,94	19,89	0,000*
	Dentro dos Grupos	27,78	37	0,75		
	Total	132,34	44			

**Tabela 32.** Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função da velocidade de propagação da onda gerada pelo equipamento *Stress Wave Timer (SW<sub>v</sub>)*.

Propriedade		Equações	R <sup>2</sup>	F
$f_m$	Geral	$f_m = 0,117.SW_v - 447,4$	0,535	86,45 <sup>**</sup>
	T1	$f_m = 0,042.SW_v - 132,9$	0,267	4,376 <sup>NS</sup>
	T2	$f_m = - 0,031.SW_v + 217,1$	0,102	1,819 <sup>NS</sup>
	T3	$f_m = - 0,013.SW_v + 152,7$	0,010	0,151 <sup>NS</sup>
	T4	$f_m = - 0,081.SW_v + 433,3$	0,632	6,879 <sup>NS</sup>
	T5	$f_m = 0,053.SW_v - 154,1$	0,536	4,630 <sup>NS</sup>
	T6	$f_m = - 0,022.SW_v + 161,1$	0,263	1,427 <sup>NS</sup>
	T7	$f_m = 0,086.SW_v - 333,1$	0,092	0,205 <sup>NS</sup>
	T8	$f_m = - 0,014.SW_v + 142,0$	0,112	0,505 <sup>NS</sup>
$E_m$	Geral	$E_m = 13,25.SW_v - 48861$	0,452	56,94 <sup>**</sup>
	T1	$E_m = - 0,350.SW_v + 9821$	0,000	0,010 <sup>NS</sup>
	T2	$E_m = 3,355.SW_v - 4368$	0,115	2,089 <sup>NS</sup>
	T3	$E_m = 1,288.SW_v + 6085$	0,007	0,079 <sup>NS</sup>
	T4	$E_m = - 7,041.SW_v + 41144$	0,314	1,861 <sup>NS</sup>
	T5	$E_m = 0,754.SW_v + 8941$	0,005	0,023 <sup>NS</sup>
	T6	$E_m = 0,834.SW_v + 4064$	0,002	0,009 <sup>NS</sup>
	T7	$E_m = 107,1.SW_v - 45168$	0,669	2,029 <sup>NS</sup>
	T8	$E_m = - 8,378.SW_v + 47457$	0,223	1,164 <sup>NS</sup>
$f_{c,0}$	Geral	$f_{c,0} = 0,061.SW_v - 231,9$	0,604	113,10 <sup>**</sup>
	T1	$f_{c,0} = - 0,005.SW_v + 51,34$	0,059	0,822 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{c,0} = - 0,002.SW_v + 49,45$	0,008	0,119 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{c,0} = 0,011.SW_v + 0,97$	0,093	1,537 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{c,0} = 0,007.SW_v + 5,12$	0,053	0,224 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{c,0} = 0,002.SW_v + 43,06$	0,019	0,079 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{c,0} = 0,006.SW_v + 11,23$	0,315	0,920 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{c,0} = 0,031.SW_v - 111,11$	0,169	0,608 <sup>NS</sup>
	T8	$f_{c,0} = 0,002.SW_v + 35,68$	0,013	0,053 <sup>NS</sup>
$f_{gv,0}$	Geral	$f_{gv,0} = 0,009.SW_v - 35,50$	0,405	29,28 <sup>**</sup>
	T1	$f_{gv,0} = 0,008.SW_v - 33,38$	0,649	3,690 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{gv,0} = 0,004.SW_v - 14,05$	0,397	2,635 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{gv,0} = - 0,031.SW_v + 146,11$	0,243	1,287 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{gv,0} = 0,008.SW_v - 31,27$	0,062	0,265 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{gv,0} = 0,001.SW_v + 2,81$	0,014	0,059 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{gv,0} = - 0,016.SW_v + 75,89$	0,522	4,365 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{gv,0} = 0,010.SW_v - 39,60$	0,221	0,850 <sup>NS</sup>
	T8	$f_{gv,0} = 0,001.SW_v - 0,50$	0,048	0,201 <sup>NS</sup>

**Tabela 33.** Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função em função do Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_{dsw}$ ).

Propriedade		Equações	R <sup>2</sup>	F
$f_m$	Geral	$f_m = 0,006.E_{dsw} - 5,83$	0,849	427,15 <sup>**</sup>
	T1	$f_m = 0,003.E_{dsw} + 27,33$	0,083	1,264 <sup>NS</sup>
	T2	$f_m = 0,003.E_{dsw} + 109,51$	0,014	0,216 <sup>NS</sup>
	T3	$f_m = 0,001.E_{dsw} + 82,33$	0,001	0,018 <sup>NS</sup>
	T4	$f_m = - 0,009.E_{dsw} + 175,38$	0,660	7,759 <sup>*</sup>
	T5	$f_m = 0,006.E_{dsw} - 5,36$	0,335	2,016 <sup>NS</sup>
	T6	$f_m = 0,002.E_{dsw} + 42,11$	0,059	0,251 <sup>NS</sup>
	T7	$f_m = - 0,017.E_{dsw} + 147,62$	0,017	0,035 <sup>NS</sup>
	T8	$f_m = - 0,003.E_{dsw} + 120,10$	0,207	1,045 <sup>NS</sup>
$E_m$	Geral	$E_m = 0,700.E_{dsw} + 1175,14$	0,732	191,54 <sup>**</sup>
	T1	$E_m = 0,089.E_{dsw} + 7378,41$	0,005	0,063 <sup>NS</sup>
	T2	$E_m = 1,159.E_{dsw} - 4381,87$	0,300	6,442 <sup>*</sup>
	T3	$E_m = - 0,331.E_{dsw} + 17169,16$	0,100	1,223 <sup>NS</sup>
	T4	$E_m = - 0,799.E_{dsw} + 18786,97$	0,323	1,910 <sup>NS</sup>
	T5	$E_m = 0,378.E_{dsw} + 6343,93$	0,065	0,279 <sup>NS</sup>
	T6	$E_m = 2,410.E_{dsw} - 19785,83$	0,613	6,337 <sup>NS</sup>
	T7	$E_m = 4,689.E_{dsw} - 26191,30$	0,189	0,234 <sup>NS</sup>
	T8	$E_m = - 1,668.E_{dsw} + 33641,18$	0,381	2,463 <sup>NS</sup>
$f_{c,0}$	Geral	$f_{c,0} = 0,003.E_{dsw} + 0,71$	0,940	1157,14 <sup>**</sup>
	T1	$f_{c,0} = 8,384E-005.E_{dsw} + 30,29$	0,001	0,016 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{c,0} = 0,000.E_{dsw} + 37,32$	0,004	0,059 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{c,0} = 0,000.E_{dsw} + 43,20$	0,006	0,086 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{c,0} = 0,002.E_{dsw} + 19,54$	0,203	1,020 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{c,0} = 0,000.E_{dsw} + 49,90$	0,003	0,013 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{c,0} = 0,001.E_{dsw} + 22,70$	0,318	0,934 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{c,0} = - 0,027.E_{dsw} + 198,73$	0,574	2,692 <sup>NS</sup>
	T8	$f_{c,0} = 0,000.E_{dsw} + 45,65$	0,006	0,022 <sup>NS</sup>
$f_{gv,0}$	Geral	$f_{gv,0} = 0,000.E_{dsw} - 0,48$	0,527	46,71 <sup>**</sup>
	T1	$f_{gv,0} = 0,003.E_{dsw} - 25,39$	0,549	2,439 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{gv,0} = 0,000.E_{dsw} + 11,17$	0,072	0,312 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{gv,0} = - 0,009.E_{dsw} + 139,39$	0,628	6,756 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{gv,0} = - 6,146E-005.E_{dsw} + 6,14$	0,000	0,001 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{gv,0} = 0,000.E_{dsw} + 1,83$	0,083	0,360 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{gv,0} = - 8,040E-0055.E_{dsw} + 5,93$	0,000	0,002 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{gv,0} = 0,003.E_{dsw} - 16,86$	0,095	0,209 <sup>NS</sup>
	T8	$f_{gv,0} = 0,000.E_{dsw} + 0,57$	0,135	0,623 <sup>NS</sup>

**Tabela 34.** Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função da velocidade de propagação da onda gerada pelo equipamento Ultrassom ( $V_{LL}$ ).

Propriedade		Equações	R <sup>2</sup>	F
$f_m$	Geral	$f_m = 0,079.V_{LL} - 340,52$	0,564	98,169 <sup>**</sup>
	T1	$f_m = 0,029.V_{LL} - 94,26$	0,159	2,655 <sup>NS</sup>
	T2	$f_m = - 0,014.V_{LL} + 148,02$	0,007	0,089 <sup>NS</sup>
	T3	$f_m = 0,003.V_{LL} + 76,15$	0,000	0,007 <sup>NS</sup>
	T4	$f_m = - 0,086.V_{LL} + 511,27$	0,628	6,765 <sup>NS</sup>
	T5	$f_m = - 0,073.V_{LL} + 493,49$	0,390	2,588 <sup>NS</sup>
	T6	$f_m = - 0,003.V_{LL} + 78,37$	0,010	0,039 <sup>NS</sup>
	T7	$f_m = 0,001.V_{LL} + 30,14$	0,001	0,002 <sup>NS</sup>
	T8	$f_m = - 0,006.V_{LL} + 108,79$	0,008	0,034 <sup>NS</sup>
$E_m$	Geral	$E_m = 8,806.V_{LL} - 35943,11$	0,529	79,591 <sup>**</sup>
	T1	$E_m = 6,597.V_{LL} - 25152,22$	0,347	7,440 <sup>*</sup>
	T2	$E_m = 9,788.V_{LL} - 39523,70$	0,441	10,255 <sup>**</sup>
	T3	$E_m = - 0,956.V_{LL} + 17226,65$	0,017	0,209 <sup>NS</sup>
	T4	$E_m = - 6,315.V_{LL} + 42144,01$	0,224	1,155 <sup>NS</sup>
	T5	$E_m = 7,721.V_{LL} - 30180,20$	0,215	1,093 <sup>NS</sup>
	T6	$E_m = 4,073.V_{LL} - 13417,31$	0,124	0,566 <sup>NS</sup>
	T7	$E_m = 4,261.V_{LL} - 16104,25$	0,948	36,524 <sup>*</sup>
	T8	$E_m = - 9,678.V_{LL} + 62145,36$	0,142	0,663 <sup>NS</sup>
$f_{c,0}$	Geral	$f_{c,0} = 0,042.V_{LL} - 177,22$	0,637	134,925 <sup>**</sup>
	T1	$f_{c,0} = - 0,004.V_{LL} + 50,30$	0,036	0,597 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{c,0} = 0,004.V_{LL} + 22,72$	0,008	0,101 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{c,0} = - 0,002.V_{LL} + 60,24$	0,003	0,051 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{c,0} = 0,019.V_{LL} - 58,42$	0,314	1,832 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{c,0} = - 0,018.V_{LL} + 150,96$	0,679	8,447 <sup>*</sup>
	T6	$f_{c,0} = - 0,008.V_{LL} + 77,83$	0,115	0,391 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{c,0} = - 0,011.V_{LL} + 74,07$	0,661	7,814 <sup>*</sup>
	T8	$f_{c,0} = 0,002.V_{LL} + 33,14$	0,008	0,031 <sup>NS</sup>
$f_{gv,0}$	Geral	$f_{gv,0} = 0,006.V_{LL} - 27,15$	0,466	37,530 <sup>**</sup>
	T1	$f_{gv,0} = 0,009.V_{LL} - 42,79$	0,462	1,720 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{gv,0} = 0,000.V_{LL} + 6,76$	0,000	0,001 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{gv,0} = - 0,013.V_{LL} + 73,36$	0,173	0,838 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{gv,0} = - 0,004.V_{LL} + 28,00$	0,016	0,064 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{gv,0} = 0,008.V_{LL} - 36,35$	0,292	1,647 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{gv,0} = 7,157E-005.V_{LL} + 4,64$	0,000	0,000 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{gv,0} = - 0,001.V_{LL} + 6,46$	0,042	0,130 <sup>NS</sup>
	T8	$f_{gv,0} = 0,001.V_{LL} - 0,11$	0,014	0,055 <sup>NS</sup>

**Tabela 35.** Modelos para a predição de Propriedades Mecânicas em função do Coeficiente de Rigidez ( $C_{LL}$ ).

Propriedade		Equações	R <sup>2</sup>	F
$f_m$	Geral	$f_m = 0,004.C_{LL} + 0,626$	0,823	349,799**
	T1	$f_m = 0,003.C_{LL} + 14,94$	0,080	1,211 <sup>NS</sup>
	T2	$f_m = 0,006.C_{LL} - 27,08$	0,116	1,572 <sup>NS</sup>
	T3	$f_m = 0,002.C_{LL} + 48,65$	0,021	0,341 <sup>NS</sup>
	T4	$f_m = - 0,006.C_{LL} + 155,71$	0,483	3,736 <sup>NS</sup>
	T5	$f_m = - 0,007.C_{LL} + 243,77$	0,441	3,152 <sup>NS</sup>
	T6	$f_m = 0,002.C_{LL} + 32,24$	0,211	1,069 <sup>NS</sup>
	T7	$f_m = 0,000.C_{LL} + 40,48$	0,002	0,007 <sup>NS</sup>
	T8	$f_m = - 0,002.C_{LL} + 123,79$	0,087	0,380 <sup>NS</sup>
$E_m$	Geral	$E_m = 0,461.C_{LL} + 1901,73$	0,726	185,177**
	T1	$E_m = 0,610.C_{LL} + 160,29$	0,239	4,396 <sup>NS</sup>
	T2	$E_m = 0,653.C_{LL} - 804,24$	0,200	3,001 <sup>NS</sup>
	T3	$E_m = - 0,456.C_{LL} + 21757,06$	0,376	7,244*
	T4	$E_m = - 0,455.C_{LL} + 16565,54$	0,204	1,023 <sup>NS</sup>
	T5	$E_m = 0,805.C_{LL} - 6436,54$	0,328	1,953 <sup>NS</sup>
	T6	$E_m = 1,471.C_{LL} - 16305,84$	0,782	14,343*
	T7	$E_m = 0,800.C_{LL} - 2198,87$	0,750	5,985 <sup>NS</sup>
	T8	$E_m = - 1,895.C_{LL} + 49004,52$	0,368	2,333 <sup>NS</sup>
$f_{c,0}$	Geral	$f_{c,0} = 0,002 + 3,324$	0,921	875,208**
	T1	$f_{c,0} = 0,000 + 27,74$	0,012	0,197 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{c,0} = 0,000 + 49,13$	0,012	0,133 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{c,0} = - 0,001 + 68,91$	0,064	1,103 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{c,0} = 0,001 + 16,72$	0,302	1,733 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{c,0} = - 0,001 + 82,02$	0,495	3,926 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{c,0} = 0,000 + 30,30$	0,040	0,083 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{c,0} = - 0,002 + 42,18$	0,750	11,984*
	T8	$f_{c,0} = - 0,001 + 55,36$	0,051	0,214 <sup>NS</sup>
$f_{gv,0}$	Geral	$f_{gv,0} = 0,000 + 0,000$	0,557	54,111**
	T1	$f_{gv,0} = 0,001 - 4,80$	0,143	0,333 <sup>NS</sup>
	T2	$f_{gv,0} = 0,000 - 2,84$	0,190	0,935 <sup>NS</sup>
	T3	$f_{gv,0} = - 0,001 + 26,53$	0,134	0,620 <sup>NS</sup>
	T4	$f_{gv,0} = - 0,001 + 13,25$	0,039	0,162 <sup>NS</sup>
	T5	$f_{gv,0} = 0,001 - 10,26$	0,384	2,490 <sup>NS</sup>
	T6	$f_{gv,0} = 0,001 - 12,55$	0,251	1,338 <sup>NS</sup>
	T7	$f_{gv,0} = - 1,466E-005 + 2,83$	0,000	0,001 <sup>NS</sup>
	T8	$f_{gv,0} = 0,000 - 2,32$	0,127	0,580 <sup>NS</sup>



**Tabela 36.** Correlações entre as propriedades não-destrutivas, mecânicas e físicas.

	$\rho_P$	$SW_P$	$E_{dswp}$	$V_{LL}$	$C_{LL}$	$f_m$	$E_m$	$f_{c,0}$	$f_{gv,0}$	ABS 2h	ABS 24h	ABS 96h	IE 2h	IE 24h	IE 96h	TNRE	
$\rho_P$	1	,744	,985	,837	,984	,940	,883	,972	,752	-,584	-,659	-,760	-,343	-,141	-,090	-,188	
Sig.		,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,017*	,338 <sup>NS</sup>	,544 <sup>NS</sup>	,201 <sup>NS</sup>	
$SW_P$		1	,805	,725	,767	,764	,743	,773	,615	-,654	-,671	-,666	-,505	-,203	-,169	-,086	
Sig.			,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,166 <sup>NS</sup>	,251 <sup>NS</sup>	,560 <sup>NS</sup>	
$E_{dswp}$			1	,856	,982	,947	,884	,975	,753	-,606	-,670	-,746	-,395	-,163	-,111	-,185	
Sig.				,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,005**	,268 <sup>NS</sup>	,453 <sup>NS</sup>	,208 <sup>NS</sup>	
$V_{LL}$				1	,914	,747	,698	,809	,674	-,431	-,458	-,503	-,241	,019	,073	-,070	
Sig.					,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,002**	,001**	,000**	,099 <sup>NS</sup>	,896 <sup>NS</sup>	,622 <sup>NS</sup>	,636 <sup>NS</sup>	
$C_{LL}$					1	,913	,858	,960	,756	-,555	-,617	-,696	-,333	-,102	-,045	-,164	
Sig.						,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,021*	,492 <sup>NS</sup>	,762 <sup>NS</sup>	,266 <sup>NS</sup>	
$f_m$						1	,921	,952	,716	-,645	-,712	-,778	-,466	-,261	-,179	-,206	
Sig.							,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,001**	,073 <sup>NS</sup>	,223 <sup>NS</sup>	,160 <sup>NS</sup>	
$E_m$							1	,913	,676	-,746	-,802	-,830	-,580	-,339	-,258	-,178	
Sig.								,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,000**	,018*	,077 <sup>NS</sup>	,225 <sup>NS</sup>	
$f_{c,0}$								1	,730	-,668	-,714	-,791	-,416	-,158	-,081	-,127	
Sig.									,000**	,000**	,000**	,000**	,003**	,283 <sup>NS</sup>	,583 <sup>NS</sup>	,391 <sup>NS</sup>	
$f_{gv,0}$									1	-,484	-,503	-,555	-,234	-,020	,107	,010	
Sig.										,000**	,000**	,000**	,109 <sup>NS</sup>	,892 <sup>NS</sup>	,468 <sup>NS</sup>	,945 <sup>NS</sup>	
ABS 2h										1	,968	,915	,770	,457	,300	-,007	
Sig.											,000**	,000**	,000**	,001**	,038*	,961 <sup>NS</sup>	
ABS 24h											1	,958	,813	,550	,448	,163	
Sig.												,000**	,000**	,000**	,001**	,269 <sup>NS</sup>	
ABS 96h												1	,649	,401	,324	,118	
Sig.													,000**	,005**	,025*	0,424 <sup>NS</sup>	
IE 2h													1	,796	,730	,403	
Sig.														,000**	,000**	,005**	
IE 24h														1	,841	,574	
Sig.															,000**	,000**	
IE 96h															1	,683	
Sig.																,000**	
TNRE																	1

**Tabela 37.** Autovalores, variância acumulada e coeficientes de ponderação das características envolvidas.

VC	Autovalor ( $\lambda_1$ )	Autovalor (%)	VA	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
VC1	713,29	86,08	86,08	0,56	-0,06	0,24	-0,09	0,11	0,17	0,00	0,50	0,25	-0,23	-0,30	0,26	0,02	0,16	0,00	-0,18
VC2	57,41	6,93	93,01	0,20	-0,08	0,09	0,06	0,07	0,01	-0,13	0,15	0,07	0,44	0,56	-0,19	0,16	0,16	0,47	-0,27
VC3	34,36	4,15	97,16	-0,21	0,09	0,01	0,14	0,10	0,03	0,05	-0,13	0,04	-0,01	0,23	0,83	-0,11	0,30	0,20	0,11
VC4	16,36	1,98	99,13	-0,06	0,04	-0,04	0,07	-0,02	-0,01	0,06	0,19	0,14	-0,47	0,09	-0,21	0,22	0,03	0,48	0,61
VC5	4,26	0,51	99,64	-0,24	0,13	-0,01	-0,23	-0,29	0,28	0,07	-0,11	0,44	-0,32	0,13	-0,06	-0,32	-0,19	0,23	-0,43
VC6	1,87	0,23	99,87	-0,12	0,06	-0,16	0,72	0,09	-0,18	-0,18	-0,10	0,36	-0,11	-0,25	-0,11	0,17	0,16	-0,01	-0,29
VC7	1,08	0,13	100,0	0,12	-0,18	-0,11	-0,37	0,41	-0,16	0,22	-0,48	0,35	-0,01	-0,07	0,07	0,43	-0,09	0,07	-0,06

Onde: VC = variável canônica; VA = variância acumulada; I)  $\rho_p$ ; II)  $SW_p$ ; III)  $E_{dsw}$ ; IV)  $V_{LL}$ ; V)  $C_{LL}$ ; VI)  $f_m$ ; VII)  $E_m$ ; VIII)  $f_{c,0}$ ; IX)  $f_{gv,0}$ ; X) ABS 2h; XI) ABS 24h; XII) ABS 96h; XIII) IE 2h; XIV) IE 24h; XV) IE 96h; XVI) TNRE.

