

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**TESE**

**Análise Físico-Química e Molhabilidade da Superfície**  
**de Madeiras Amazônicas**

**Keiti Roseani Mendes Pereira**

**2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE**  
**DE MADEIRAS AMAZÔNICAS**

**KEITI ROSEANI MENDES PEREIRA**

*Sob a orientação da Professora*

**Rosilei Aparecida Garcia**

*e Co-orientação do Professor*

**Alexandre Miguel do Nascimento**

Tese submetida como requisito parcial para  
obtenção do grau de **Doutor**, no Curso de Pós-  
Graduação em Ciências Ambientais e  
Florestais, Área de Concentração em Ciência e  
Tecnologia de Produtos Florestais

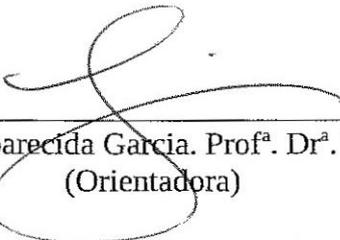
Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

**KEITI ROSEAM MENDES PEREIRA**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências no curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM: 20/02/2017



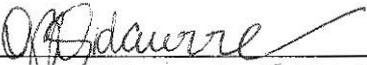
---

Rosilei Aparecida Garcia. Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. UFRRJ  
(Orientadora)



---

Moisés Silveira Lobão. Prof. Dr. UFAC



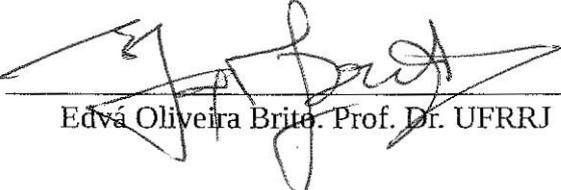
---

Graziela Baptista Vidaurre. Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. UFES



---

Roberto Carlos Costa Lelis. Prof. Dr. UFRRJ



---

Edvã Oliveira Brito. Prof. Dr. UFRRJ

**Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico**

**Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

P436a Pereira, Keiti Roseani Mendes, 1976 -  
Análise físico-química e molhabilidade da superfície de  
madeiras amazônicas / Keiti Roseani Mendes Pereira. - 2017.  
118 f.: il.

Orientadora: Rosilei Aparecida Garcia.  
Coorientador: Alexandre Miguel do Nascimento.  
Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,  
Ciências Ambientais e Florestais, 2017.

1. ângulo de contato. 2. rugosidade superficial. 3.  
inativação da superfície. 4. espectroscopia no infravermelho.  
5. usinagem da madeira. I. Garcia, Rosilei Aparecida, 1975-,  
orient. II. Miguel do Nascimento, Alexandre, -, coorient. III  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Ciências  
Ambientais e florestais. IV. Título.

*A estrada é longa. Não importa. A beleza da paisagem  
vai nos aliviar o cansaço da viagem.*

Padre Fábio de Melo

À minha filha Maria Carolina, pelo amor incondicional.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde e força para executar esse trabalho.

À minha filha Maria Carolina, por compreender os dias de ausência e me incentivar a cada dia na execução dessa tese.

À meus familiares, em especial minha mãe por sempre incentivar a minha caminhada no conhecimento acadêmico e de vida.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) por ter me dado a oportunidade da aquisição de conhecimento.

À Universidade Federal do Acre (UFAC) pelo incentivo e confiança sempre na minha vida profissional.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Acre (FAPAC) pela concessão de bolsa de doutorado.

À empresária Adelaide de Fátima, por abrir as portas de sua madeireira Nova Canaã para coleta de minhas madeiras.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, pela confiança em meu projeto e minha pessoa.

À minha orientadora Rosilei Garcia, pelo seu tempo de dedicação e paciência em todos os momentos recorridos a ela. Pela confiança no trabalho e amizade desses anos.

Ao professor Alexandre Miguel pelas sugestões prestadas na qualidade de co-orientador que contribuiu para desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Alexandre Monteiro pela amizade, incentivo e colaboração para o desenvolvimento prático.

Ao professor João Vicente, por permitir a utilização do equipamento do MEV e à amizade de sempre.

Aos técnicos de laboratório, em especial ao José Carlos pela amizade e apoio nas análises químicas.

Ao aluno de graduação Marcos Gonzaga que contribuiu na aquisição no acompanhamento de exposição das madeiras no laboratório.

Aos amigos do Laboratório de Processamento da Madeira, em especial o marceneiro Dinaldo e Pablo Vieira que me ajudaram na confecção das minhas amostras e medições dos parâmetros de rugosidade.

À professora Natália Dias e ao novo amigo Ananias, pela paciência e contribuição nos resultados dessa tese.

Aos amigos Juliana, Bruno e Gisele, me ajudando a resolver assuntos difíceis encontrados no caminho dessa tese.

Aos amigos ao longo desse caminho de doutoranda, nas apresentações de seminários, desenvolvimento de trabalhos e nas palavras de confiança e incentivo.

Aos meus grandes amigos conquistados nessa fase da minha vida, em ordem alfabética, Carolina Nogueira, Letícia Maria e Marcondes Coelho pelas conversas e almoços inesquecíveis na minha vida.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram na execução deste trabalho.

## RESUMO GERAL

PEREIRA, Keiti Roseani Mendes. **Análise físico-química e molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas**. 2017. 103 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2017.

As características físicas (morfologia celular, rugosidade superficial, densidade) e químicas (principalmente os extrativos) determinam a molhabilidade da superfície da madeira, a qual está diretamente relacionada aos processos de adesão e revestimento. A rugosidade superficial por sua vez depende das condições de usinagem, da estrutura celular da madeira e da interação entre ambas. O objetivo geral deste estudo foi avaliar as características físico-químicas e a molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas oriundas do Estado do Acre. Os objetivos específicos foram: (i) avaliar a qualidade da superfície das madeiras através de métodos visuais e microscópicos; (ii) avaliar o efeito das condições de preparo da superfície (aplainamento e lixamento) e da estrutura anatômica na rugosidade superficial em que foram abordadas, principalmente, a textura e as dimensões dos vasos; (iii) avaliar o efeito das características físicas (rugosidade, textura e densidade aparente) na molhabilidade superficial; e (iv) avaliar o efeito do envelhecimento na inativação da superfície e sua correlação com o teor e a natureza dos extrativos. Oito espécies de madeira foram estudadas: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) e cumaru (*Dipteryx odorata*). As madeiras foram classificadas de acordo com a textura (fina, média e grossa) e a densidade aparente determinada segundo a norma ASTM D 2395-93. A avaliação visual foi feita segundo a norma ASTM D 1666-2011. As análises microscópicas foram realizadas através de imagens digitais pelo software Image-Pro<sup>®</sup> Plus e da microscopia eletrônica de varredura com o auxílio do equipamento HITACHI TM300. Os parâmetros de amplitude ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  e  $R_v$ ) foram determinados pelo rugosímetro de agulha TR 200 segundo a norma NBR ISO 4287:2002. O ângulo de contato foi determinado através do Drop Shape Analyser DSA 100. A inativação da superfície foi avaliada após o envelhecimento em condições controladas após 7, 14 e 21 dias. Análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) foram realizadas pelo espectrômetro VARIAN 640-IR FT-IR em modo de transmitância. O lixamento diminuiu a rugosidade superficial das madeiras, exceto para o parâmetro  $R_v$  das madeiras de angelim pedra e cumaru. A textura da madeira afetou a rugosidade e a molhabilidade da superfície. A avaliação visual apresentou uma correlação significativa com o parâmetro  $R_a$ . O tipo de preparo (aplainamento x lixamento) afetou o ângulo de contato. Os parâmetros de rugosidade apresentaram correlações significativas e negativas com o ângulo de contato na superfície lixada em que as superfícies mais rugosas apresentaram menor ângulo, provavelmente devido à maior penetração do líquido por capilaridade. A densidade aparente da madeira afetou a molhabilidade, entretanto, ela não explica os diferentes comportamentos de molhabilidade entre as espécies dentro de uma mesma classe de textura. As análises FT-IR dos extratos das madeiras mostraram a presença de álcoois, éteres, ésteres, ácidos carboxílicos, alcanos, alcenos, aminas e amidas, aldeídos, cetonas, anel aromático, compostos alifáticos fluorados e nitrogenados; e que as madeiras de angelim e cumaru apresentaram menos compostos com caráter hidrofóbico que causaram uma menor inativação química da superfície.

**Palavras-chave:** anatomia da madeira, ângulo de contato, espectroscopia no infravermelho, inativação da superfície, rugosidade superficial, usinagem da madeira.

## GENERAL ABSTRACT

PEREIRA, Keiti Roseani Mendes. **Physical-chemical analysis and wettability of the surface of Amazonian woods**. 2017. 103 p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forestry Science). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2017.

Physical (cell morphology, surface roughness, density) and chemical (mainly extractives) characteristics determine the wettability of the wood surface, which is directly related to the adhesion and coating process. Surface roughness depends on the machining conditions, cellular structure and interaction between both. The principal objective of this study was to evaluate the physico-chemical characteristics and surface wettability of Amazonian woods from Acre Staty. The specific objectives were: (i) to evaluate the wood surface quality through visual and microscopic methods; (ii) to evaluate the effect of surface preparation conditions (planing and sanding) and the anatomical features on the surface roughness, by a texture and vessels measurements approach; (iii) to evaluate the effect of physical characteristics (surface roughness, texture and apparent density) on the surface wettability; and (iv) to evaluate the effect of aging on the surface inactivation and the its interaction with the nature and content of the extractives. Eight woods were studied: abiuarana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) and cumaru (*Dipteryx odorata*). Woods were classified according to the texture (fine, medium and coarse) and the apparent density determined according to ASTM D 2395-93 standard. The visual evaluation was made according to the ASTM D 1666-2011 standard. Microscopic analyzes were performed through digital images by the Image-Pro<sup>®</sup> Plus software and by scanning electron microscopy using HITACHI TM300 apparatus. Amplitude parameters ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  and  $R_v$ ) were determined by the needle type roughmeter model TR 200 according to NBR ISO 4287:2002 standard. Contact angle was determined by the Drop Shape Analyser DSA 100. Surface inactivation was evaluated after 7, 14 and 21 days of aging in controlled conditions. Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy analysis were performed using the VARIAN 640-IR FT-IR spectrometer in transmittance mode. Sanding reduced the surface roughness of woods, except for the  $R_v$  parameter of angelim pedra and cumaru woods. Wood texture affected the roughness and wettability. The visual evaluation had a significantly relationship with  $R_a$  parameter. The type of surface preparation (planing x sanding) affected the contact angle. Roughness parameters had significant and negative correlations with the contact angle on the sanded surface in which roughened surfaces had lower angle, probably due to the greater penetration of the liquid by capillarity. Wood apparent density has an impact on the surface wettability, however, it did not explain the different wettability behavior among species within the same texture class. FT-IR analysis of wood extracts showed the presence of alcohols, ethers, esters, carboxylic acids, alkanes, alkenes, amines and amides, aldehydes, ketones, aromatic ring, fluorinated aliphatic and nitrogen compounds; and that the angelim and cumaru species had less hydrophobic compounds inducing a lower chemical inactivation of the wood surface

**Keywords:** wood anatomy, contact angle, infrared spectroscopy, surface inactivation, surface roughness, wood machining.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Lista das madeiras amazônicas em função das classes de textura e tipo de grã. ...	15
<b>Tabela 2.</b> Critérios de classificação da qualidade da superfície da madeira definido pela norma ASTM D1666-2011. ....	17
<b>Tabela 3.</b> Comprimento de amostragem ( <i>cut-off</i> ) recomendado em função da rugosidade média ( $R_a$ ) e da rugosidade total ( $R_z$ ). ....	17
<b>Tabela 4.</b> Análise microscópica quantitativa dos vasos das madeiras amazônicas. ....	19
<b>Tabela 5.</b> Autovetores das componentes principais I e II obtidas pela análise da componente principal (PCA). ....	20
<b>Tabela 6.</b> Valores médios dos parâmetros de rugosidade superficial das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície e das classes de textura. ....	28
<b>Tabela 7.</b> Média dos postos de Kruskal-Wallis da rugosidade superficial em função da textura da madeira nas superfícies aplainada e lixada. ....	29
<b>Tabela 8.</b> Correlação entre os parâmetros de rugosidade superficial e a avaliação visual. ....	36
<b>Tabela 9.</b> Valores médios de densidade e ângulo de contato das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície e das classes de textura. ....	55
<b>Tabela 10.</b> Correlação entre os ângulos de contato e a textura e os parâmetros de rugosidade das madeiras amazônicas. ....	59
<b>Tabela 11.</b> Média dos postos de Kruskal-Wallis do ângulo de contato em função das classes de textura das madeiras amazônicas para as superfícies aplainada e lixada. ....	60
<b>Tabela 12.</b> Média de ângulos de contato das madeiras amazônicas em função da condição da superfície. ....	74
<b>Tabela 13.</b> Valores dos teores extrativos das madeiras amazônicas obtidos em extração com os solventes ciclohexano, acetato de etila e metanol. ....	77
<b>Tabela 14.</b> Valores de pico da radiação infravermelha analisados pelos espectros FT-IR para o solvente ciclohexano, os grupos funcionais e a atribuição da banda. ....	80
<b>Tabela 15.</b> Valores de pico da radiação infravermelha analisados pelos espectros FT-IR para o solvente acetato de etila, os grupos funcionais e a atribuição da banda. ....	82

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Madeira de *Cedrela odorata*. (A-B) Imagens macroscópicas das seções transversal e tangencial, respectivamente. (C-E) Imagens microscópicas das seções transversal, tangencial e radial, respectivamente (RICHTER; DALLWITZ, 2009)..... 11
- Figura 2.** Madeira de *Dipteryx odorata*. (A-B) Imagens macroscópicas das seções transversal e tangencial, respectivamente. (C-E) Imagens microscópicas das seções transversal, tangencial e radial, respectivamente (RICHTER; DALLWITZ, 2009)..... 12
- Figura 3.** Pâmetros do perfil de rugosidade  $R_v$ : profundidade máxima do vale do perfil = distância do vale mais profundo à linha média.  $R_p$ : altura máxima do pico do perfil = distância do pico máximo à linha média.  $R_t$ : rugosidade máxima = soma do pico máximo e do vale máximo observado no comprimento de medição,  $R_t = R_p + R_v$ ..... 14
- Figura 4.** Avaliação da rugosidade. *lt*: comprimento total. *lm*: comprimento de medição. *le*: comprimento de amostragem (*cut-off*)..... 14
- Figura 5.** Diferentes perfis superficiais com o mesmo valor de  $R_a$  (ESCOPEL, 2010)..... 14
- Figura 6.** (A) Mapa do Estado do Acre. (B) Localização da Floresta Macauã no município de Sena Madureira, Acre..... 15
- Figura 7.** Microprensa utilizada para restringir os defeitos da madeira durante a secagem. . 16
- Figura 8.** Aspecto visual da superfície das oito madeiras amazônicas estudadas. .... 16
- Figura 9.** Diagrama de ordenação da análise da componente principal (PCA). Variáveis: Dtm = diâmetro tangencial mínimo dos poros, DtM = diâmetro tangencial médio dos poros, DtMx = diâmetro tangencial máximo dos poros, Fpm = frequência mínima dos poros, FpM = frequência média dos poros, FpMx = frequência máxima dos poros, Av = área dos vasos e Fv = fração vasos. .... 20
- Figura 10.** Avaliação visual da qualidade das superfícies aplainada (A) e lixada (B) das madeiras amazônicas segundo a norma ASTM D 1666-2011. Classificação das notas: 1 = excelente, 2 = boa; 3 = regular; 4 = ruim e 5 = muito ruim. .... 22
- Figura 11.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de abiuarana (textura fina)..... 23
- Figura 12.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de garapeira (textura fina)..... 23
- Figura 13.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de jequitibá (textura fina)..... 24
- Figura 14.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de cedro (textura média). .... 24

<b>Figura 15.</b> Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de angelim (textura grossa).....	25
<b>Figura 16.</b> Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de angelim pedra (textura grossa). .....	25
<b>Figura 17.</b> Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de cerejeira (textura grossa).....	26
<b>Figura 18.</b> Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de cumaru (textura grossa).....	26
<b>Figura 19.</b> Rugosidade média ( $R_a$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.....	29
<b>Figura 20.</b> Rugosidade total ( $R_z$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.....	30
<b>Figura 21.</b> Rugosidade máxima ( $R_t$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.....	31
<b>Figura 22.</b> Altura máxima do pico do perfil de rugosidade ( $R_p$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície. ....	32
<b>Figura 23.</b> Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade ( $R_v$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície. ....	33
<b>Figura 24.</b> Perfil de rugosidade superficial típico da madeira de angelim pedra. (A) Superfície aplainada. (B) Superfície lixada. ....	34
<b>Figura 25.</b> Perfil de rugosidade superficial típico da madeira de cumaru. (A) Superfície aplainada. (B) Superfície lixada. ....	35
<b>Figura 26.</b> Ângulo de contato de Young (CRUZ, 2006). .....	46
<b>Figura 27.</b> Medição do ângulo de contato em superfícies ideais e reais.....	46

<b>Figura 28.</b> Comportamento da gota sobre uma superfície. (A) Ângulo de contato abaixo de 90°. (B) Ângulo de contato zero (espalhamento total). (C) Ângulo de contato maior que 90°. (D) Ângulo de contato igual à 180° (RIBEIRO; PANDOLFELLI, 2008).....	47
<b>Figura 29.</b> Método de Wilhelmy para determinação do ângulo de contato em avanço e em recuo (KRÜSS GmbH, 1993).....	48
<b>Figura 30.</b> Método de Wilhelmy mostrando a força F em função da profundidade de imersão h durante a imersão e retirada de uma amostra sólida em um líquido. FA e FR: força obtida pela curva de regressão linear em avanço e em recuo, respectivamente. Ff: força final ou peso do líquido absorvido durante o teste (SON; GARDNER, 2004).....	48
<b>Figura 31.</b> (A) Sistema de análise de formato da gota DSA100 (KRÜSS GmbH, Hamburg, Alemanha) utilizado para as medições de ângulo de contato na superfície da madeira. (B) Mesa de suporte da amostra e seringa dosadora. ....	51
<b>Figura 32.</b> Variação do ângulo de contato da superfície das madeiras (aplainada e lixada) amazônicas em função do tempo.....	54
<b>Figura 33.</b> Ângulo de contato inicial das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.....	56
<b>Figura 34.</b> Ângulo de contato final das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.....	57
<b>Figura 35.</b> Ângulo de contato médio das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.....	58
<b>Figura 36.</b> Ângulo de contato inicial das madeiras amazônicas em função da condição da superfície. ....	72
<b>Figura 37.</b> Ângulo de contato final das madeiras amazônicas em função da condição da superfície. ....	73
<b>Figura 38.</b> Ângulo de contato médio das madeiras amazônicas em função da condição da superfície. ....	73
<b>Figura 39.</b> Comportamento do ângulo de contato das madeiras amazônicas em função do tempo e da condição da superfície. ....	76
<b>Figura 40.</b> Teor de extrativos das madeiras amazônicas . ....	78

- Figura 41.** Espectro FT-IR dos extratos das madeiras amazônicas obtidos em solvente ciclohexano..... 85
- Figura 42.** Espectro FT-IR dos extratos das madeiras amazônicas obtidos em solvente acetato de etila. .... 85

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	1
CAPÍTULO I .....	4
RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE MADEIRAS AMAZÔNICAS: UMA ABORDAGEM ANATÔMICA .....	4
RESUMO .....	5
ABSTRACT .....	6
1 INTRODUÇÃO .....	7
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1 Espécies estudadas .....	9
2.2 Perfil de rugosidade superficial .....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Material.....	15
3.2 Análise microscópica e visual da superfície usinada .....	16
3.3 Rugosidade superficial .....	17
3.4 Análises estatísticas.....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1 Análise microscópica e visual da superfície .....	19
4.2 Rugosidade superficial .....	27
4.3 Correlação entre os parâmetros de rugosidade superficial e a avaliação visual .....	36
5 CONCLUSÕES .....	37
CAPÍTULO II.....	38
EFEITO DA RUGOSIDADE, TEXTURA E DENSIDADE NA MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE DE MADEIRAS AMAZÔNICAS .....	38
RESUMO .....	39
ABSTRACT .....	40
1 INTRODUÇÃO .....	41
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	43
2.1 Fatores físicos que afetam a molhabilidade.....	43
2.2 Análises de ângulo de contato .....	44
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.1 Material.....	50
3.2 Análises de ângulo de contato .....	50
3.3 Rugosidade superficial .....	51

3.4 Análises estatísticas.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1 Comportamento do ângulo de contato em função do tempo .....	53
4.2 Efeito da rugosidade, textura e densidade na molhabilidade da superfície .....	55
5 CONCLUSÕES .....	61
CAPÍTULO III .....	62
EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE DE MADEIRAS AMAZÔNICAS: UMA ABORDAGEM QUÍMICA .....	62
RESUMO .....	63
ABSTRACT .....	64
1 INTRODUÇÃO .....	65
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	67
2.1 Inativação da superfície da madeira.....	67
2.2 Espectroscopia no infravermelho .....	68
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
3.1 Material.....	69
3.2 Análises de ângulo de contato .....	69
3.3 Análises químicas .....	69
3.4 Análises estatísticas.....	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1 Efeito do envelhecimento na molhabilidade superficial da madeira .....	71
4.2 Análises de espectroscopia FT-IR dos extrativos .....	77
5 CONCLUSÕES .....	86
CONCLUSÕES GERAIS .....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICES .....	96

## INTRODUÇÃO GERAL

A Floresta Amazônica apresenta uma área total estimada em aproximadamente 5,5 milhões de km<sup>2</sup>, sendo que cerca de 60% dessa área está no Brasil e o restante distribuído pela Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela. No Brasil, a Floresta Amazônica abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e uma pequena área do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso (AMBIENTE BRASIL, 2015). O estado do Acre situa-se na parte Ocidental da Floresta Amazônica brasileira, parte mais preservada e de maior biodiversidade. O estado detém 88% de área de floresta tropical, e apresenta o maior número de planos de manejos florestais na Amazônia por apresentar uma situação fundiária favorável à essa prática. De sua área total (16,42 milhões ha), 45,81% (7,52 milhões ha) são de áreas protegidas, incluindo unidades de proteção integral e de uso sustentável e terras indígenas (ACRE, 2013).

Apesar de a atual tendência estar voltada para a utilização de madeiras provenientes de reflorestamento e da maior conscientização ambiental dos consumidores, as madeiras provenientes de florestas nativas ainda têm uma importância econômica e social relevante, especialmente no estado do Acre. O estado do Acre foi o pioneiro no manejo florestal comunitário, recaindo também no pioneirismo da certificação florestal para produtos madeireiros de origem comunitária na região Norte. Em 2010, havia no estado 15 associações comunitárias estabelecidas, reunindo 249 famílias, detentoras de um total de 52.652,87 ha de florestas manejadas (ARAÚJO; CORREIA, 2014).

A madeira oriunda de planos de manejo cresceu significativamente nos últimos anos. Em 2012, foi aprovada uma área de plano de manejo de 25.051,09 ha e mais 15.151,24 ha no ano de 2013, totalizando um volume de madeira proveniente de manejo florestal de 80.118,71 m<sup>3</sup> (2012) e 67.898,97 m<sup>3</sup> (2013) incluindo a região Norte, Nordeste e Centro Oeste (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2015). O estado do Acre possui 8,2 milhões ha com potencial de suprimento de matéria-prima para a indústria florestal, sendo oriundos de manejo florestal comunitário (4,2 milhões ha), manejo florestal de florestas públicas (1 milhão ha) e manejo florestal empresarial (3 milhões ha) (ACRE, 2012). O estado apresentou um acréscimo anual de madeira autorizada entre os anos de 2005 a 2012, mostrando que políticas públicas de estímulo ao setor florestal e o aumento do nível de industrialização ampliaram a origem de madeira oriunda de planos de manejo (SILVA et al., 2015).

A exploração de madeira no estado do Acre apresenta uma grande contribuição na indústria de transformação. Em 2009, a fabricação de produtos de madeira (40 unidades) e de móveis (19 unidades) representou maior número de unidades do que a fabricação de produtos alimentícios. Dados de 2012 mostraram que a madeira é o principal produto de exportação do Estado do Acre representando aproximadamente 56% do total de produtos exportados (ACRE, 2013). Levantamentos realizados pelo IMAZON e pela SEBRAE revelaram que em 36 municípios na região Norte foram identificados 1820 estabelecimentos, dentre madeiras e moveleiras, nos principais polos moveleiros da região. Os estados do Acre, Pará e Amazonas fornecem cerca de 83% do consumo total de madeira processada para fabricação de móveis (PEREIRA et al., 2010).

A utilização da madeira na cadeia produtiva de móveis representa cerca de 60 a 70% da matéria prima consumida pela indústria moveleira e inclui tanto madeiras amazônicas quanto madeiras de reflorestamento (em especial *Pinus*) e painéis reconstituídos à base de madeira tais como MDP (*Medium Density Particleboard*), MDF (*Medium Density*

*Fiberboard*) e compensados (ZENID, 2007). O restante da matéria prima inclui estofados, metais e plástico.

A região amazônica desempenha um papel de elevada importância como fornecedora de madeiras duras para os mercados internacional e nacional, sendo neste último caso principalmente para as regiões Sudeste e Sul (BIASI; ROCHA, 2007). Os principais pólos moveleiros do Brasil se encontram nas regiões sul e sudeste, onde as indústrias estão localizadas principalmente em Bento Gonçalves (RS), Lagoa Vermelha (RS), São Bento do Sul (SC), Araçuaia (PR), Mirassol (SP), Votuporanga (SP), Grande São Paulo (SP), Ubá (MG), grande Belo Horizonte (MG), grande Rio de Janeiro (RJ), Linhares (ES) e Fortaleza (CE) (ABIMÓVEL, 2014). As espécies nativas de madeira serrada oriundas da região Centro Oeste e Norte do Brasil que suprem o mercado são *Andira* sp.; *Dinizia* sp.; *Vatairea* sp.; *Pithecellobium* sp.; *Hymenolobium* sp. (angelim), *Hymenolobium* sp.; (angelim-pedra), *Vochysia* sp. *Qualea* sp. (cambara), *Cedrelinga catenaeformis* D. Ducke. (cedrão), *Erismia uncinatum* Warm. (cedrinho) *Parkia* sp. (faveiro), *Apuleia* sp. (garapeira), *Tabebuia* sp. (ipê), *Mesilaurus itauba* (Meissn). (itaúba), *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) (ROBERT et al., 2012).

As dez principais espécies processadas pela indústria madeireira no Acre em 2005 foram: cumaru ferro (*Dipterix odorata* (Aubl.) Willd.), cumaru cetim (*Apuleia molaris* Spruce ex Benth.), tauari (*Couratari macrosperma* A. C. Sm.), mulateiro (*Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook.f. ex K.Schum.), samaúma (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.), cedro (*Cedrela odorata* L.), jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), cerejeira (*Amburana acreana* (Ducke) A. C. Sm.), angelim (*Ormosia arborea* (Vell.) Harms), ipê (*Tabebuia serratifolia* (Vahl) G. Nicholson) (SANTOS, 2007). Silva et al. (2015) avaliando as espécies madeiras licenciadas entre 2005 e 2012, constataram que apenas 15 espécies foram exploradas legalmente, sendo elas: cumaru-ferro (*Dipteryx* spp.), garapeira (*Apuleia* spp.), sumaúma (*Ceiba* spp.), açacu (*Hura crepitans* L.), matamatá (*Eschweilera* spp.), jatobá (*Hymenaea* spp.), tauari (*Couratari* spp.), manitê (*Brosimum* spp.), caucho (*Castilla ulei* Warb.), cedro (*Cedrela* spp.), guaribuba (*Clarisia racemosa* Ruiz e Pav.), faveira (*Parkia* spp.), copaíba (*Copaifera* spp.), guaribeiro (*Phyllocarpus riedelii* Tul.) e abiurana (*Pouteria* spp.).

A preferência por madeiras amazônicas tradicionais deve-se às suas características estéticas (cor e desenho), alta resistência mecânica, boas propriedades físicas, durabilidade natural e boa usinagem. Apesar da preferência e valorização, há poucos estudos sobre a qualidade da superfície das madeiras amazônicas. Alguns autores (MELO et al., 2013; STANGERLIN et al., 2013; AMORIM et al., 2013) estudaram as propriedades da superfície (ex.: rugosidade superficial e molhabilidade) de algumas madeiras amazônicas; entretanto, muitas espécies do estado do Acre apresentam características distintas de indivíduos da mesma espécie provenientes de outras regiões amazônicas e a falta de conhecimento sobre essas características afeta a qualidade do produto final.

A qualidade da superfície da madeira é de suma importância para indústria de processamento devido ao seu impacto direto na qualidade do produto final. Os processos de usinagem, adesão e revestimentos são frequentes utilizados nas indústrias moveleiras situadas nos polos madeireiros do Acre, contudo a falta de técnicas quantitativas que permitam qualificar a superfície da madeira ainda não é empregada de forma eficaz.

A caracterização da superfície da madeira é complexa, inclui as propriedades físicas (morfologia, rugosidade e permeabilidade) e químicas (composição molecular e grupos funcionais) e envolvem a utilização de métodos microscópicos, espectroscópicos e termodinâmicos, alguns deles utilizados neste estudo. Os métodos microscópicos fornecem informações sobre a morfologia da superfície, podendo ser utilizada a microscopia confocal à

laser, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia de força atômica. Os métodos espectroscópicos fornecem informação sobre a química da superfície, nos quais podem ser utilizados a espectroscopia molecular (ex.: infravermelho com transformada de Fourier/*Fourier Transform Infrared*-FT-IR, infravermelho com transformada de Fourier no modo de reflectância total atenuada/*Fourier transform attenuated total reflectance infrared*-FT-ATR e Raman com transformada de Fourier/*Fourier Transform Raman*-FT-Raman), a espectroscopia eletrônica (ex. fotoelétrons excitados por raios X/*X-ray photoelectron*- XPS) e a espectroscopia de massa. Já os métodos termodinâmicos são utilizados para determinar a energia da superfície através de análises de ângulo de contato ou de técnicas como cromatografia de gás inversa e energia de superfície total (TSHABALALA, 2005).

Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi analisar as propriedades físico-químicas e a molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas proveniente de manejo florestal visando sua utilização na indústria moveleira. Os objetivos específicos foram: (i) avaliar a qualidade da superfície através de métodos visuais e microscópicos; (ii) avaliar o efeito das condições de preparo da superfície (aplainamento e lixamento) e da estrutura anatômica na rugosidade superficial; (iii) avaliar o efeito das características físicas (rugosidade superficial, textura e densidade) na molhabilidade da superfície através de análises de ângulo de contato; e (iv) avaliar o efeito do envelhecimento natural na inativação da superfície de madeiras amazônicas através de análises de ângulo de contato e de espectroscopia FT-IR.

O estudo baseou-se nas seguintes hipóteses: (i) a molhabilidade da superfície da madeira depende de fatores físicos (estrutura celular, textura) e químicos (teor e natureza dos extrativos); (ii) madeiras com maiores densidades apresentam menor rugosidade superficial; (iii) a rugosidade da superfície da madeira depende da usinagem, da estrutura anatômica e da interação entre ambas; (iv) a rugosidade superficial afeta a energia da superfície da madeira; e (v) maiores teores de extrativos tornam a superfície da madeira menos molhável; e (vi) a natureza dos extrativos afeta a molhabilidade da superfície da madeira. Oito espécies de folhosas foram avaliadas, as quais foram selecionadas em função da sua disponibilidade e da importância comercial para a indústria moveleira no estado do Acre.

Esta tese foi dividida em três capítulos. O Capítulo I, intitulado “Rugosidade superficial de madeiras amazônicas: uma abordagem anatômica” visou avaliar a qualidade da superfície das madeiras amazônicas através de métodos visuais e microscópicos; e avaliar o efeito das condições de preparo da superfície (aplainamento e lixamento) e da estrutura anatômica na rugosidade superficial em que foram abordadas, principalmente, a textura e as dimensões dos vasos. O Capítulo II, intitulado “Efeito da rugosidade, textura e densidade na molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas”, avaliou o efeito das características físicas (rugosidade superficial, textura e densidade) na molhabilidade da superfície das madeiras amazônicas através de análises de ângulo de contato pelo método DSA (*Drop Shape Analysis*). O Capítulo III, intitulado “Efeito do envelhecimento na molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas: uma abordagem química” visa avaliar o efeito do envelhecimento natural na inativação da superfície das madeiras amazônicas através de análises de ângulo de contato e de espectroscopia FT-IR.

## **CAPÍTULO I**

### **RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE MADEIRAS AMAZÔNICAS: UMA ABORDAGEM ANATÔMICA**

### **SURFACE ROUGHNESS OF THE AMAZONIAN WOODS: AN ANATOMICAL APPROACH**

## RESUMO

A rugosidade superficial é um parâmetro importante na avaliação da qualidade da superfície e afeta diretamente o desempenho de adesivos e revestimentos e, conseqüentemente, a qualidade do produto final. A rugosidade depende das condições de usinagem, da estrutura celular da madeira e da combinação entre ambas. Os objetivos deste estudo foram avaliar a qualidade da superfície de oito espécies de madeiras amazônicas através de métodos visuais e microscópicos; e avaliar o efeito das condições de preparo da superfície (aplainamento e lixamento) e da estrutura anatômica na rugosidade superficial em que foram abordadas, principalmente, a textura e as dimensões dos vasos. As madeiras estudadas foram: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) e cumaru (*Dipteryx odorata*). As madeiras foram classificadas de acordo com a textura (fina, média e grossa) e a densidade aparente determinada segundo a norma ASTM D 2395-93. As superfícies das madeiras foram avaliadas visualmente segundo a norma ASTM D 1666-2011. As análises microscópicas foram realizadas quantitativamente através de imagens digitais em que foram mensurados os vasos pelo software Image-Pro<sup>®</sup> Plus; e qualitativamente através de imagens de microscopia eletrônica de varredura com o auxílio do equipamento HITACHI TM300. A rugosidade superficial foi determinada pelo rugosímetro de agulha modelo TR 200 segundo a norma NBR ISO 4287:2002 em que foram obtidos os parâmetros de amplitude ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  e  $R_v$ ) nas superfícies aplainadas e lixadas. O lixamento diminuiu a rugosidade superficial das madeiras para todos os parâmetros, exceto para o parâmetro  $R_v$  das madeiras de angelim pedra e cumaru. A textura da madeira afetou significativamente a rugosidade superficial, principalmente na superfície lixada. A avaliação visual apresentou uma correlação significativa com o parâmetro  $R_a$ .

**Palavras chaves:** parâmetros de amplitude, textura da madeira e usinagem.

## ABSTRACT

Surface roughness is an important parameter to evaluate the surface quality and directly affects the adhesive and coating performance and thus the quality of the final product. The roughness depends on the machining conditions, the cell structure of the wood and the combination of both. The objectives of this study were to evaluate the surface quality of the eight species of Amazonian woods through visual and microscopic methods; and the effect of surface preparation conditions (planning and sanding) and the anatomical features, by a texture and vessels measurements approach, in the surface roughness. The studied woods were: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) and cumaru (*Dipteryx odorata*). Woods were classified according to the texture (fine, medium and coarse) and the apparent density determined according to ASTM D 2395-93 standard. Wood surfaces were evaluated visually according to the ASTM D 1666-2011 standard. Microscopic analyzes were performed quantitatively through digital images which were made vessel measurements by the Image-Pro Plus software and quantitatively through scanning electron microscopy using HITACHI TM300 apparatus. Surface roughness was determined by the needle type roughmeter model TR 200 according to NBR ISO 4287:2002 standard where amplitude parameters ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  and  $R_v$ ) were obtained on the planned and sanded wood surfaces. Wood texture affected significantly surface roughness, principally in sanded surfaces. The visual evaluation had a significantly correlation with  $R_a$  parameter. Sanding reduced the surface roughness for all parameters, except for the  $R_v$  parameter of angelim pedra and cumaru woods.

**Keywords:** amplitude parameters, wood texture and machining.

## 1 INTRODUÇÃO

A rugosidade caracteriza as irregularidades da superfície da madeira e afeta diretamente a aplicação e a durabilidade dos revestimentos. Estas irregularidades podem ser determinadas pelas medições da altura, largura e forma dos picos e vales ocasionados durante o processo de usinagem ou pela própria estrutura anatômica da madeira (MAGOSS, 2008). A rugosidade superficial é um critério importante para avaliar as condições das ferramentas, o desempenho da usinagem e a qualidade do produto. Vários trabalhos procuraram avaliar o efeito da usinagem na rugosidade superficial (KILIC; HIZIROGLU; BURDURLU, 2006; MARTINS et al., 2011). Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006), estudando o efeito da usinagem na rugosidade superficial das madeiras de *Fagus orientalis* e *Populus tremula*, observaram uma diminuição da rugosidade com o aumento do número de grão da lixa. Já no trabalho realizado por Martins et al. (2011), as operações de usinagem (aplainamento x lixamento) não afetaram significativamente a rugosidade da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii*. Esses diferentes resultados podem ser explicados pela estrutura celular particular de cada espécie de madeira demonstrando a importância de se estudar o efeito da usinagem associada à estrutura anatômica. Segundo Csanády, Magoss e Tolvaj (2015), a maior parte da rugosidade resulta da estrutura anatômica da madeira. A presença de grãos irregulares, sílica, nós, a porosidade e dimensões de fibras e vasos interferem diretamente nas características da superfície (BAJIC; LELA; ZIVKOVIC, 2008). A variação do tamanho e da quantidade de poros entre espécies ou mesmo dentro de mesma espécie de madeira afetam a rugosidade da superfície podendo ocasionar grandes vales devido a sua remoção durante o processo de usinagem. A posição do plano de corte dos vasos também afeta a rugosidade pois as cavidades são cortadas em diferentes ângulos e posições em relação à superfície, produzindo vales de diferentes formas e tamanhos (CSANÁDY, MAGOSS; TOLVAJ, 2015).

A rugosidade superficial pode ser mensurada através de vários equipamentos, os quais podem ser divididos em duas categorias: (i) por contato (ex.: apalpamento mecânico do tipo “stylus”) e (ii) sem contato (ex.: interferometria de luz branca) (BHUSHAN, 2001). Os instrumentos de medição por contato são aqueles que exploram a superfície do material pelo contato direto utilizando apalpador e fornecem os desvios na forma de perfil. Esses equipamentos têm a capacidade de calcular parâmetros e emitir registros do perfil graficamente (MACHADO et al., 2009). Segundo a norma NBR ISO 4287 (2002), a superfície pode ser avaliada de forma quantitativa através dos parâmetros de rugosidade (R) e ondulação (W). As ondulações consistem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades (MACHADO et al., 2009). O perfil da superfície pode ser avaliado através dos parâmetros de textura superficial, que são os de amplitude e de espaçamento e dos parâmetros híbridos (PETROPOULOS, 2007). Os parâmetros de amplitude referem-se às medições dos deslocamentos verticais dos perfis; os parâmetros de espaçamento às medições de espaçamentos irregulares ao longo da superfície, independente da amplitude dessas irregularidades; e os parâmetros híbridos estão relacionados tanto com a amplitude como com o espaçamento das irregularidades superficiais (FORM TALYSURF SERIES OPERATOR'S HANDBOOK, 1985). Os parâmetros de amplitude são: rugosidade aritmética ou média ( $R_a$ ), desvio médio quadrático do perfil ( $R_q$ ), amplitude máxima de perfil por comprimento de medição ( $R_z$ ), amplitude total de perfil ( $R_t$ ), amplitude máxima de picos dentro do comprimento de ondas ( $R_p$ ), amplitude máxima de vales dentro do comprimento de ondas ( $R_v$ ) e média da altura máxima de picos em cada comprimento de ondas ( $R_{pm}$ ) (CHANG, 1999). O parâmetro  $R_a$  é o mais utilizado devido ao seu baixo coeficiente de variação, sendo fornecido em equipamentos mais simples para medição da superfície de produtos de madeira. Porém, esse parâmetro não fornece valores reais de alturas de picos e vales e é extremamente

sensível a presença de vasos, não sendo adequado para superfícies que apresentam uma frequência muito alta de vales ou picos. Os parâmetros de espaçamento são determinados pela largura média dos elementos do perfil ( $R_{Sm}$ ) e os parâmetros híbridos compreendem a inclinação média do perfil ( $R_{\Delta a}$ ), o desvio médio quadrático da inclinação do perfil ( $R_{\Delta q}$ ), o raio de aspereza ( $r_p$ ) e o comprimento desenvolvido do perfil ( $R_{l_0}$ ) (PETROPOULOS, 2007). As medições sem contato por interferometria de luz branca permitem obter um perfil topográfico da superfície em 3D e têm sido bastante utilizadas recentemente para avaliar a rugosidade da madeira e compósitos à base de madeira (HERNÁNDEZ; LLAVÉ; KOUBAA, 2014; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016; ZHONG et al., 2013).

A avaliação qualitativa da superfície da madeira também é geralmente combinada às medições de rugosidade. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) são frequentemente utilizadas para avaliar as superfícies das madeiras usinadas (UGULINO; HERNANDEZ, 2016). Além disso, métodos visuais e táteis também podem ser empregados na indústria madeireira por avaliar a rugosidade superficial de forma rápida e econômica (FUJIWARA; FUJII; OKUMURA, 2005). Entretanto, os parâmetros qualitativos devem ser relacionados aos quantitativos (ex.: parâmetros de amplitude da rugosidade superficial), de forma a assegurar que os métodos visual e tátil possam ser utilizados na avaliação da qualidade do produto final (FUJIWARA et al., 2004; FUJIWARA; FUJII; OKUMURA, 2005).

Neste contexto, os objetivos deste estudo foram avaliar a qualidade da superfície de oito espécies de madeiras amazônicas através de métodos visuais e microscópicos; e avaliar o efeito das condições de preparo da superfície (aplainamento e lixamento) e da estrutura anatômica na rugosidade superficial em que foram abordadas, principalmente, a textura e as dimensões dos vasos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Espécies estudadas

#### *Amburana acreana*

O gênero *Amburana* apresenta duas espécies: a *Amburana acreana* (Ducke) A. C. Sm. e a *Amburana cearensis* Ducke (família: Fabaceae). Por apresentarem grande proximidade em suas características, alguns botânicos consideram a espécie *Amburana acreana* como sinonímia ou variedade da *Amburana cearensis* (DUCKE, 1949; FLINTA, 1960 citado por CARVALHO, 2007). A espécie *Amburana acreana* é vulgarmente conhecida como cerejeira e ocorre na Amazônia Ocidental do Brasil (Amazonas, Acre, Rondônia e Mato Grosso) e na Bolívia (CARVALHO, 1994).

A madeira dessa espécie apresenta alto valor comercial sendo uma das espécies florestais madeireiras mais importantes no Acre (ARAÚJO, 2014). A madeira apresenta densidade entre 0,60 e 0,62 g.cm<sup>-3</sup>, cerne pardo amarelado com manchas rosadas, alburno esbranquiçado, textura grossa, grã irregular à revessa, cheiro agradável e peculiar (CARVALHO, 2007), aspecto liso e agradável e é empregada na fabricação de móveis finos, folhas decorativas, esculturas, lambris, balcões e marcenaria em geral (LORENZI, 2002).

#### *Apuleia molaris*

A espécie *Apuleia molaris* Spruce ex Benth. (família: Fabaceae) ocorre na região norte do Brasil. Essa espécie possui características muito semelhantes à espécie *Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbride que ocorre nos estados do Rio Grande do Sul na Floresta Latifoliada Semidecídua e, no sul da Bahia e Espírito Santo na Floresta Pluvial Atlântica (LORENZI, 1998).

Segundo Leite et al. (2013), a madeira de *Apuleia molaris* é muito pesada e dura; de cerne bege-amarelado a róseo-acastanhado e alburno branco amarelado; apresenta difícil trabalhabilidade devido ao alto teor de sílica; com alburno e cerne distintos, textura fina, grã entrecruzada e alta resistência ao ataque de fungos e organismos xilófagos, mesmo quando em uso externo. Por outro lado, Lorenzi (1998) afirma que a madeira dessa espécie é moderadamente pesada, com densidade igual a 0,83 g.cm<sup>-3</sup>, dura, fácil de trabalhar, de alta durabilidade, podendo, entretanto ser atacada por cupins.

Araújo (2007) avaliando as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Apuleia molaris*, encontrou uma densidade básica de 0,75 g.cm<sup>-3</sup>; contrações tangencial de 10,1% e radial de 6,5%; dureza Janka paralela e transversal às fibras de 7306 N e 8287 N, respectivamente; resistência à esforços mecânicos de compressão paralela às fibras de 63,15 MPa e resistência no limite proporcional à compressão perpendicular às fibras de 15,49 MPa; módulo de ruptura à flexão estática de 124,74 MPa e módulo de elasticidade à flexão estática de 12651 MPa; tração perpendicular às fibras de 5,49 MPa, fendilhamento 6,67 MPa e cisalhamento 12,85 MPa.

A madeira é empregada em marcenarias, tanoaria, esquadrias, carrocerias, trabalhos de torno, na construção civil, como vigas, ripas, caibros, tacos e tábuas para assoalhos, em usos externos como postes, moirões, dormentes, vigas de pontes e esteios (LORENZI, 1998).

### *Cariniana sp.*

O gênero *Cariniana* (família: Lecythidaceae) apresenta 16 espécies, conhecidas vulgarmente como jequitibá, tauari e castanha de macaco, sendo todas comercializadas sem distinção (SMITH et al., 2015). As madeiras desse gênero variam de leves à moderadamente pesadas e são empregadas na marcenaria, na construção em geral, cabos e ferramentas, caixotaria, canoas, remos, instrumentos musicais, brinquedos, lápis, bobinas, carretéis e pasta mecânica (CAMARGO et al., 2003).

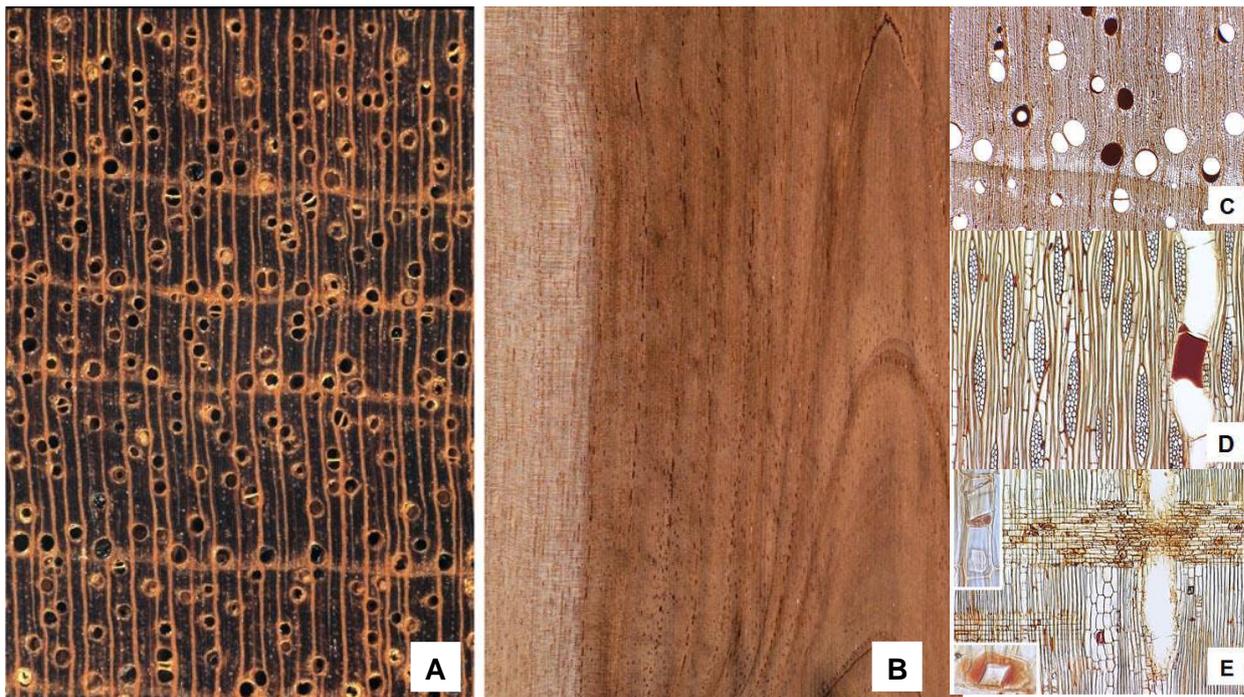
Essas espécies ocorrem no Brasil nas regiões Sul, Sudeste e Norte e em alguns países da América do Sul (Bolívia, Paraguai e Peru). No Acre ocorrem quatro espécies, sendo elas: *Cariniana decandra* Ducke, *Cariniana domestica* (Mart.) Miers, *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze e *Cariniana micrantha* Ducke (CARVALHO, 2003).

A madeira da espécie *Cariniana decandra* apresenta densidade básica de  $0,59 \text{ g.cm}^{-3}$ , cerne marrom pálido e alburno branco, grã direita e textura média (FREYRE, 1993). A madeira de *Cariniana domestica* apresenta densidade básica de  $0,59 \text{ g.cm}^{-3}$ , anéis de crescimento diferenciados por faixas escuras de forma irregular, cerne e alburno indistintos, grã direita à entrecruzada, textura média, porosidade difusa, parênquima axial reticulado com presença de gomas e cristais tipo rombóide, e raios heterogêneos (CUSTÓDIO, 2005). A madeira de *Cariniana estrellensis* apresenta densidade aparente entre  $0,70$  e  $0,78 \text{ g.cm}^{-3}$  (a 15% de umidade), anéis de crescimento aparentemente demarcado por zonas fibrosas, cerne branco levemente rosado e pouco distinto do alburno, textura média, grã direita e parênquima axial apotraqueal (MAINIERI; CHIMELO, 1989; CARVALHO, 2003). A madeira de *Cariniana micrantha* apresenta densidade aparente entre  $0,58$  e  $0,68 \text{ g.cm}^{-3}$  (a 12% de umidade), cerne vermelho acastanhado, alburno pouco distinto, grã direita, textura média e anéis de crescimento demarcados por zonas fibrosas tangenciais (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

### *Cedrela odorata*

As espécies do gênero *Cedrela* (família: Meliaceae) são conhecidas como cedro, cedro-rosa, cedro amargoso, cedro-do-amazonas e internacionalmente como acajou femelle, ceder, cedro colorado. O gênero é representado por várias espécies, sendo as principais *Cedrela odorata* L. e *Cedrela angustifolia* Sessé & Moc ex DC (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1989). Ocorrem nos estados do Amazonas, Acre, Amapá, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo além da América Central, Argentina, Bolívia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Paraguai, Peru, Suriname (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1989).

A madeira de *Cedrela odorata* apresenta anéis de crescimento distintos, cerne e alburno distintos com cerne vermelho à marrom (madeira verde de cor clara, escurecendo com o tempo de exposição) e odor característico (aromático). Apresenta porosidade anular à semianular, poros dispostos em padrão não específico, solitários e agrupados radialmente de 2 à 3 vasos, placas de perfuração simples, pontuações intervasculares alternas e depósitos nos vasos do cerne de cor marrom avermelhado escuro; fibras de paredes finas; parênquima axial marginal, apotraqueal difuso e difuso em agregados, paratraqueal vasicêntrico e aliforme (raro); raios homogêneos (células procumbentes) e heterogêneos (células quadradas e eretas restritas às fileiras marginais) e multisseriados; cristais nos parênquimas radial e axial (RICHTER; DALLWITZ, 2009). A Figura 1 apresenta as características macroscópicas e microscópicas da madeira de *Cedrela odorata*.



**Figura 1.** Madeira de *Cedrela odorata*. (A-B) Imagens macroscópicas das seções transversal e tangencial, respectivamente. (C-E) Imagens microscópicas das seções transversal, tangencial e radial, respectivamente (RICHTER; DALLWITZ, 2009).

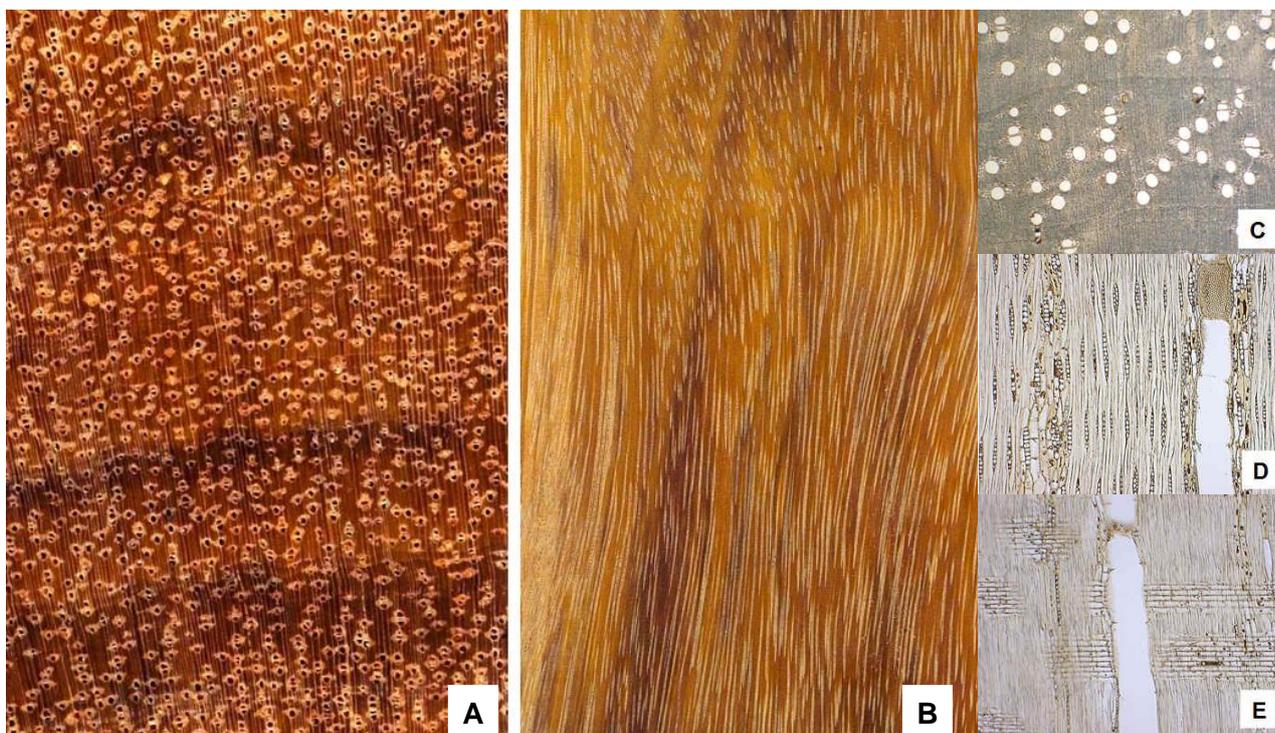
A madeira de *Cedrela odorata* é leve, com densidade básica de  $0,42 \text{ g.cm}^{-3}$  (MALLQUE; KIKATA, 1994), apresenta retratibilidade linear e volumétrica baixas, propriedades mecânicas entre baixa e média, sendo indicada para partes internas de móveis finos, folhas faqueadas decorativas, contraplacados, moldura para quadros e instrumentos musicais (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1998).

#### *Dipteryx odorata*

A espécie *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. (família: Fabaceae) é popularmente conhecida como cumaru, cumaru-ferro, cumaru-verdadeiro, cumaru-amarelo, cambaru, cumaru-da-folha-grande, cumaru-do-amazonas, cumaru-escuro, cumarurana, muimapagé e champagne (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1989). Ela ocorre nos Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, em outros países como Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela e na América Central (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2014). A madeira de *Dipteryx odorata* é uma das mais processadas pela indústria no Acre, representando 30% do volume de madeira processada nos anos de 1990 e 2005 (ARAÚJO, 2014).

A madeira de *Dipteryx odorata* apresenta anéis de crescimento indistintos ou ausente, cerne e alborno distintos com cerne de cor variando entre cinzenta marrom à castanho claro amarelada e grã entrecruzada. Apresenta poros difusos, solitários, germinados e múltiplos de 3 a 6, obstruídos por óleo-resina; fibras de paredes grossas; parênquima axial paratraqueal aliforme e confluyente; raios homogêneos, unisseriados e poucos multisseriados ou bisseriados; estrutura estratificada (raios, parênquima axial, elementos de vasos e algumas fibras); e células cristalíferas septadas (MALLQUE; KIKATA, 1994; RICHTER; DALLWITZ, 2009; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2014). A Figura 2 apresenta as características macroscópicas e microscópicas da madeira de *Dipteryx odorata*.

A madeira dessa espécie apresenta densidade básica de  $0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ , densidade aparente de  $1,09 \text{ g.cm}^{-3}$  à 15% de umidade, é de difícil trabalhabilidade mas recebe excelente acabamento no torneamento, de difícil colagem devido à sua natureza oleosa mas pode ser polida e receber acabamentos como pintura e verniz. Apresenta alta durabilidade aos organismos xilófagos (fungos apodrecedores e cupins) e é amplamente usada na construção civil, em assoalhos, móveis de alta qualidade, esquadrias, embarcações e cabos de ferramentas (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1989; 2014).



**Figura 2.** Madeira de *Dipteryx odorata*. (A-B) Imagens macroscópicas das seções transversal e tangencial, respectivamente. (C-E) Imagens microscópicas das seções transversal, tangencial e radial, respectivamente (RICHTER; DALLWITZ, 2009).

### *Hymenolobium excelsum*

O gênero *Hymenolobium* (família: Fabaceae) apresenta 15 espécies, todas conhecidas vulgarmente por angelim ou angelim pedra, as quais são extremamente parecidas e comercializadas como uma única espécie. A espécie *Hymenolobium excelsum* Ducke ocorre nos estados do Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Roraima e Amapá, sendo conhecida popularmente como angelim, angelim-comum, angelim-da-mata, angelim rajado, angelim-rajado-da-mata e fava-folha-fina e (FERREIRA et al., 2004).

A madeira de *Hymenolobium excelsum* é pesada, com densidade de  $0,66$  à  $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ , anéis de crescimento marcados por zonas de tecido fibroso, cerne de aspecto fibroso, vermelho castanho sobre fundo amarelo pardacento, com estiras claras; alborno amarelo acinzentado; grã regular à revessa e textura grossa (INPA, 1991; REMADE, s.d.). A madeira apresenta porosidade difusa, parênquima axial paratraqueal aliforme confluyente, às vezes marginal; raios multisseriados e fibras libriiformes (REMADE, s.d.). Ela é muito utilizada em dormentes, na construção em geral, tornearia, marcenaria, carpintaria, tacos e objetos de adornos (FERREIRA et al., 2004).

### *Parkia pendula*

A espécie *Parkia pendula* (Wild.) Benth. Ex Walp. (família: Fabaceae) é popularmente conhecida como visgueiro, boloteira, anelím-saia, anelím-bolota, fava-bolota, faveira-bolota, faveira-benguê, jupumba e rabo-de-arara (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1989). Ela ocorre nos Estados do Acre, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, sul da Bahia e norte do Espírito Santo na floresta fluvial.

A madeira apresenta camadas de crescimento às vezes demarcadas por finíssimas linhas de parênquima marginal; parênquima axial aliforme losangular; raios multisseriados, raramente unisseriados; óleo resina; e fibras libríformes (MAINIERI; CHIMELO, 1989). A cor da madeira varia, encontrando-se desde cerne marrom amarelado e alburno branco acizentado (IBAMA, 1989), à cerne e alburno indistintos branco palha levemente amarelado (MAINIERI; CHIMELO, 1989) e cerne marrom claro a marrom e alburno amarelo pálido (SOUZA et al., 2002). Sua madeira apresenta densidade média,  $0,60 \text{ g.cm}^{-3}$  a 12% de umidade (SOUZA et al., 2002), e características físicas e mecânicas favoráveis para uso comercial, promovendo alto índice de exploração da espécie, o que diminui consideravelmente os exemplares em sua área de ocorrência natural. É amplamente usada na construção civil, embarcações, móveis, artigos domésticos e decorativos, taboados, caixotaria, lâminas para compensados e canoas (SOUZA et al., 1997; LOUREIRO et al., 2000).

### *Pouteria guianensis*

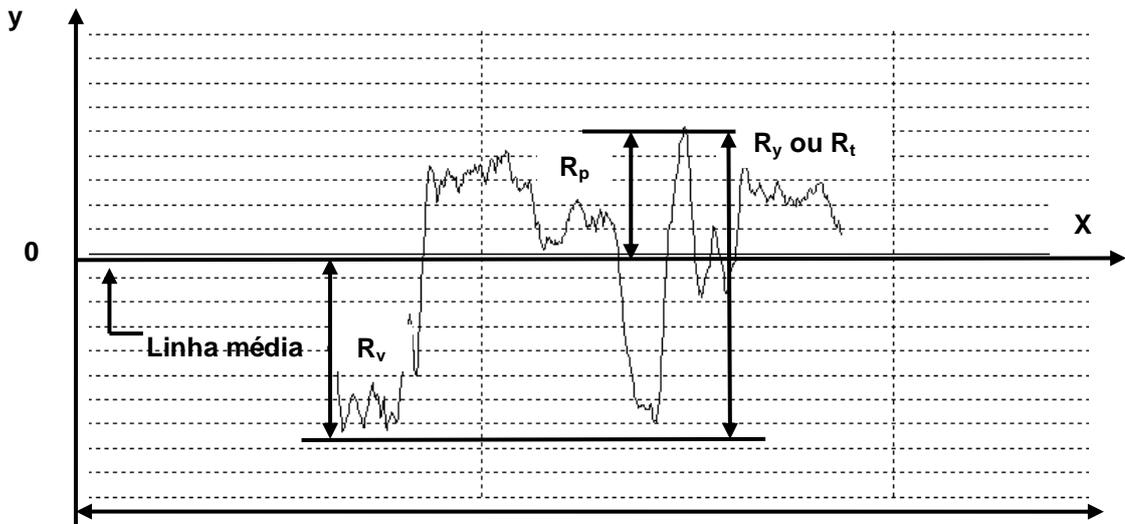
A espécie *Pouteria guianensis* Aubl. (família: Sapotaceae) é conhecida popularmente como abiurana, abiurana abiu, abiurana vermelha e abiurana branca. A maioria das espécies do gênero *Pouteria* ocorre na América do Sul (Colômbia, Peru e Venezuela) (MONTEIRO et al., 2007; PENNINGTON, 1991). No Brasil, ocorrem na Amazônia e na região costeira da Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo (PENNINGTON, 1991).

A madeira apresenta densidade básica de  $0,83 \text{ g.cm}^{-3}$  e excelente acabamento na plaina, na lixa e no torno. É utilizada em cruzetas, dormentes esquadrias, estrutura de cobertura, piso interno e externo, estaca marítima (MELO; CAMARGOS, sd).

## 2.2 Perfil de rugosidade superficial

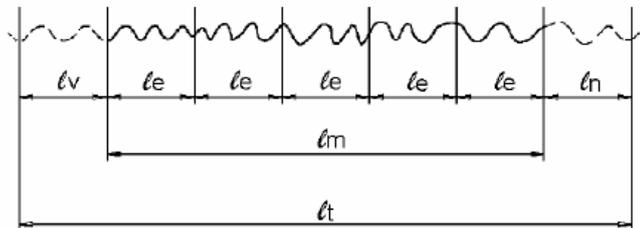
As medições da rugosidade superficial segundo a NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2002) são realizadas avaliando os parâmetros de amplitude, sendo eles: rugosidade aritmética ou média ( $R_a$ ) que é determinada em função da linha média do perfil de rugosidade; rugosidade total ( $R_z$ ) que corresponde à distância vertical entre o pico mais alto ( $R_p$ ) e o vale mais profundo ( $R_v$ ) no comprimento de medição, independente dos valores de rugosidade parcial; e rugosidade máxima ( $R_y$  ou  $R_t$ ) definida como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição (*cut-off*) (Figura 3). A linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (*le*).

O comprimento de amostragem, chamado de *cut-off* (*le*), não corresponde a distância total (*lt*) percorrida pelo apalpador sobre a superfície. A distância percorrida pelo apalpador deverá ser igual a 5 (*le*) mais a distância para atingir a velocidade de medição (*lv*) e a parada do apalpador (*lm*) (Figura 4).



**Comprimento de medição**

**Figura 3.** Pârametros do perfil de rugosidade  $R_v$ : profundidade máxima do vale do perfil = distância do vale mais profundo à linha média.  $R_p$ : altura máxima do pico do perfil = distância do pico máximo à linha média.  $R_t$ : rugosidade máxima = soma do pico máximo e do vale máximo observado no comprimento de medição,  $R_t = R_p + R_v$ .



**Figura 4.** Avaliação da rugosidade.  $l_t$ : comprimento total.  $l_m$ : comprimento de medição.  $l_e$ : comprimento de amostragem (*cut-off*).

O parâmetro  $R_a$ , mesmo sendo um parâmetro muito utilizado em vários processos de fabricação, o seu valor não define a forma de irregularidades do perfil. Podendo apresentar um mesmo valor de  $R_a$  para diferentes processos de usinagem (Figura 5). Portanto, nem sempre consiste em um parâmetro ideal para avaliar o perfil de rugosidade.

O parâmetro  $R_q$  tem efeito de ampliar os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos, evidenciando defeitos ou marcas em superfícies bem acabadas, além disso, representa o desvio padrão da distribuição de altura do perfil. Os parâmetros  $R_t$  e  $R_z$  são utilizados quando se é necessário ou deseja especificar a altura máxima da rugosidade, sendo estes influenciados diretamente por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO et al., 2009).



**Figura 5.** Diferentes perfis superficiais com o mesmo valor de  $R_a$  (ESCOPEL, 2010).

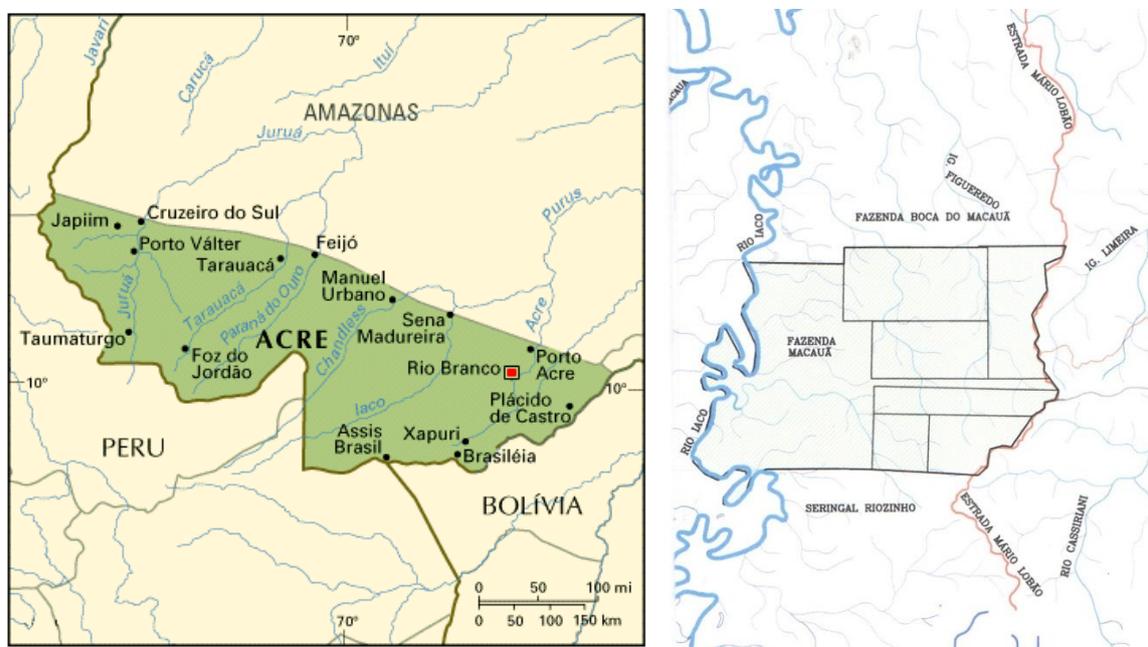
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material

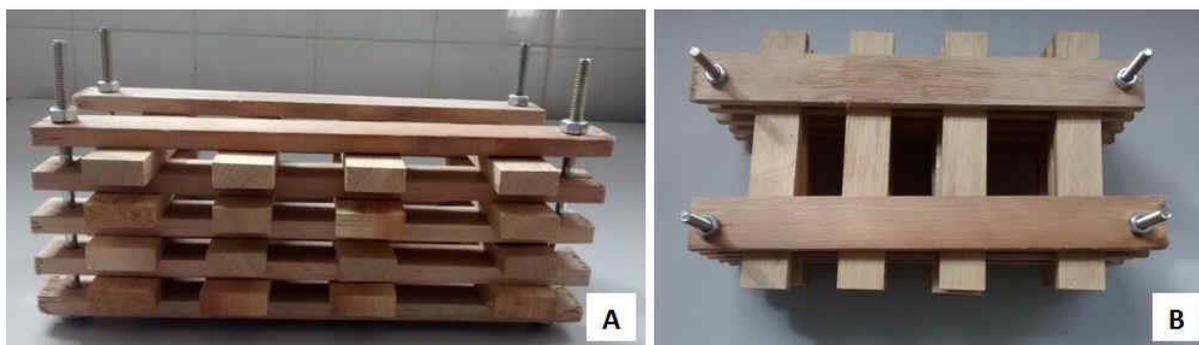
Oito espécies de madeiras amazônicas (Tabela 1) foram coletadas na Floresta Macauã (floresta nativa manejada) situada no município de Sena Madureira, Acre (Figura 6). As toras foram processadas na empresa Nova Canaã em Sena Madureira com o uso de uma serra fita para o desdobro primário e serra circular simples para o refilo das peças e destopadeira. Na serraria foram obtidas amostras de 30 x 75 x 150 mm<sup>3</sup> (espessura x largura x comprimento), as quais foram aplainadas, lixadas em uma das faces e em seguida redimensionadas em amostras de 10 x 30 x 150 mm<sup>3</sup> (espessura x largura x comprimento) (Figura 7). O material foi acondicionado em câmara climática à 20°C e 65% de umidade relativa (UR) até atingir peso constante e utilizou-se microprensas para restringir os defeitos de secagem (Figura 7).

**Tabela 1.** Lista das madeiras amazônicas em função das classes de textura.

Textura	Nome vulgar	Nome científico	Família
Fina	Abiurana	<i>Pouteria guianensis</i> Aubl.	Sapotaceae
	Garapeira	<i>Apuleia molaris</i> Spruce ex Benth.	Fabaceae
	Jequitibá	<i>Cariniana</i> sp.	Lecythidaceae
Média	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Meliaceae
Grossa	Angelim	<i>Parkia pendula</i> (Wild.) Benth. Ex Walp.	Fabaceae
	Angelim pedra	<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	Fabaceae
	Cerejeira	<i>Amburana acreana</i> (Ducke) A. C. Sm.	Fabaceae
	Cumaru	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Fabaceae



**Figura 6.** (A) Mapa do Estado do Acre. (B) Localização da Floresta Macauã no município de Sena Madureira, Acre.



**Figura 7.** Microprensa utilizada para restringir os defeitos da madeira durante a secagem.

As madeiras foram classificadas de acordo com a textura (fina, média e grossa), a qual foi caracterizada macroscopicamente quanto ao tamanho relativo das células (Tabela 1). Na classe de textura fina foram incluídas as madeiras que apresentaram uma estrutura uniforme com células geralmente pequenas enquanto que na classe de textura grossa foram incluídas as madeiras que apresentam uma estrutura composta por poros de grandes diâmetros e/ou parênquima abundante (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; CORADIN; MUÑIZ, 1992). A textura média foi considerada como uma classe intermediária. A Figura 8 apresenta o aspecto visual das madeiras estudadas.

A densidade aparente das madeiras foi determinada segundo a norma ASTM D 2395-93 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 1999).



**Figura 8.** Aspecto visual da superfície das oito madeiras amazônicas estudadas.

### 3.2 Análise microscópica e visual da superfície usinada

A análise visual das superfícies aplainadas e lixadas foi feita de acordo com a norma ASTM D1666-2011 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2011). A Tabela 2 apresenta o sistema de classificação utilizado na avaliação qualitativa das superfícies. As notas seguiram uma definição preestabelecida dos defeitos para cada superfície. Na superfície aplainada foram avaliados defeitos como: marcas de cavaco, grã arrancada, grã felpuda e grã levantada. Na superfície lixada, os defeitos analisados foram: riscamento de superfície e grã felpuda.

**Tabela 2.** Critérios de classificação da qualidade da superfície da madeira definido pela norma ASTM D1666-2011.

Nota	Grau	Classe
1	Ausência de defeitos	Excelente
2	Superfície da peça usinada afetada em menos de 50% pelo defeito	Bom
3	Superfície da peça usinada afetada em 50% pelo defeito	Regular
4	Superfície da peça usinada afetada em mais de 50% pelo defeito	Ruim
5	Superfície da peça usinada afetada em 100% pelo defeito	Muito ruim

As análises microscópicas foram realizadas de forma quantitativa e qualitativa. Para a análise quantitativa, foram obtidas imagens digitais com o auxílio de uma câmera digital adaptada a um microscópio binocular OLYMPUS CX 40 diretamente na seção transversal da madeira. O diâmetro tangencial do lume dos elementos de vasos e a frequência dos vasos foram mensurados através do programa Image-Pro<sup>®</sup> Plus The Proven Solution<sup>™</sup>, versão 4.5.0.29, seguindo as especificações da IAWA Committee (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS COMMITTEE, 1989). A área dos poros e a fração dos poros (= área dos poros x frequência média dos poros) também foram calculadas. A classificação das dimensões dos vasos foi feita de acordo com a Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas (COPANT, 1973). A análise qualitativa das superfícies aplainadas e lixadas foi feita através de imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando o equipamento HITACHI TM3000.

### 3.3 Rugosidade superficial

Os ensaios de rugosidade superficial foram realizados com o rugosímetro de agulha modelo TR 200 de acordo com a norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2002). As medições de rugosidade foram realizadas em cinco pontos de cada amostra no sentido perpendicular à grã nas superfícies aplainada e lixada. Para cada ponto foram determinados os seguintes parâmetros de amplitude: rugosidade aritmética ou média ( $R_a$ ): determinada em função da linha média do perfil de rugosidade; rugosidade total ( $R_z$ ): correspondente à distância vertical entre o pico mais alto ( $R_p$ ) e o vale mais profundo ( $R_v$ ) no comprimento de medição, independente dos valores de rugosidade parcial; e rugosidade máxima ( $R_y$  ou  $R_t$ ): definida como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição (*cut-off*).

Os valores de amplitude variam de acordo com os parâmetros utilizados, portanto, o comprimento de amostragem (*cut-off*) para cálculo de  $R_a$  e  $R_z$  foi fixado de acordo com as recomendações do rugosímetro tal como apresentado na Tabela 3. O comprimento de medição foi de 5 mm com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 2,5 mm para todas as amostras e utilizou-se filtro Gauss.

**Tabela 3.** Comprimento de amostragem (*cut-off*) recomendado em função da rugosidade média ( $R_a$ ) e da rugosidade total ( $R_z$ ).

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de amostra recomendado ( <i>cut-off</i> )
>2 a 10	>10 a 50	2,5 mm
>0,1 a 2	>0,5 a 10	0,8 mm
<0,1	<0,5	0,25 mm

As maiores dificuldades para a avaliação da rugosidade superficial da madeira é que as irregularidades são decorrentes tanto do processo de usinagem, quanto da estrutura anatômica intrínseca de cada espécie (GURAU; MANSFIELD-WILLIAMS; IRLE, 2005, 2006). Sendo assim, os parâmetros de rugosidade foram obtidos a partir de cinco pontos pré-definidos em uma área da superfície livre de defeitos aparentes produzidos pelo preparo da superfície ou irregularidade da grã.

### 3.4 Análises estatísticas

A análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) foi realizada com auxílio do software Minitab<sup>®</sup> 16, com o intuito de agrupar as espécies de madeira em função das características anatômicas. As variáveis anatômicas consideradas na análise de PCA foram: diâmetro tangencial mínimo dos vasos (Dtm), diâmetro tangencial médio dos vasos (DtM), = diâmetro tangencial máximo dos vasos (DtMx), frequência mínima dos vasos (Fpm), frequência média dos vasos (FpM), frequência máxima dos vasos (FpMx), área dos vasos (Av) e fração vasos (Fv). O PCA é uma técnica da estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais (VARELLA, 2008). Foram consideradas as médias padronizadas com desvio padrão igual a 1, para cada característica anatômica estudada. Para a análise das componentes principais utilizou-se a matriz de correlação dos dados. As combinações lineares estabelecidas foram interpretadas por meio dos autovetores normalizados e das correlações entre as variáveis originais e as componentes principais.

As análises estatísticas dos parâmetros de rugosidade foram realizadas através do programa STATISTICA 7.0. A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias através do teste de Levene à 95% de probabilidade. Os dados dos parâmetros de rugosidade não atenderam os pressupostos da análise de variância, portanto, utilizou-se os testes não paramétricos de Wilcoxon-Mann-Whitney (comparação entre dois grupos independentes) e Kruskal-Wallis (comparação entre múltiplos grupos independentes).

A rugosidade superficial foi avaliada através dos seguintes parâmetros (variáveis dependentes):  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ , visando comparar o preparo da superfície (aplainada e lixada) e as classes de textura (fina, média e grossa) das madeiras. Uma análise de correlação foi realizada entre os parâmetros de rugosidade superficial e a análise visual.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise microscópica e visual da superfície

A Tabela 4 apresenta a análise microscópica quantitativa dos poros das madeiras amazônicas. Os resultados do diâmetro tangencial do lúmen dos vasos permitiram classificá-los em vasos médios para as madeiras de abiurana, garapeira, angelim e cerejeira; e vasos grandes para as madeiras de jequitibá, cedro, angelim pedra e cumaru. Os vasos da madeira de angelim pedra apresentaram o maior diâmetro tangencial médio enquanto que os vasos da madeira de angelim apresentaram o menor diâmetro tangencial médio (Tabela 4). Quanto a frequência dos vasos, estes foram classificados como muito numerosos nas madeiras de garapeira e abiurana; numerosos nas madeiras jequitibá, cedro, angelim e cumaru; e pouco numerosos nas madeiras de angelim pedra e cerejeira.

**Tabela 4.** Análise microscópica quantitativa dos vasos das madeiras amazônicas.

Espécie	Diâmetro tangencial dos vasos ( $\mu\text{m}$ )			Frequência dos vasos (vasos/ $\text{mm}^2$ )			Área vasos ( $\text{mm}^2$ )	Fração vasos
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo		
Abiurana	93,7	170,1	234,3	30	33,2	36	0,023	0,754
Garapeira	78,1	171,2	166,6	24	36,1	45	0,023	0,831
Jequitibá	135,4	205,1	271,1	12	16,4	22	0,033	0,542
Cedro	136,9	230,1	333,3	9	14,0	22	0,042	0,582
Angelim	93,8	148,3	223,8	13	19,2	25	0,017	0,332
Angelim pedra	150,9	247,8	331,1	3	6,1	10	0,048	0,294
Cerejeira	109,4	171,9	260,3	5	6,6	9	0,023	0,153
Cumaru	135,3	219,1	276,1	10	16,4	23	0,038	0,618

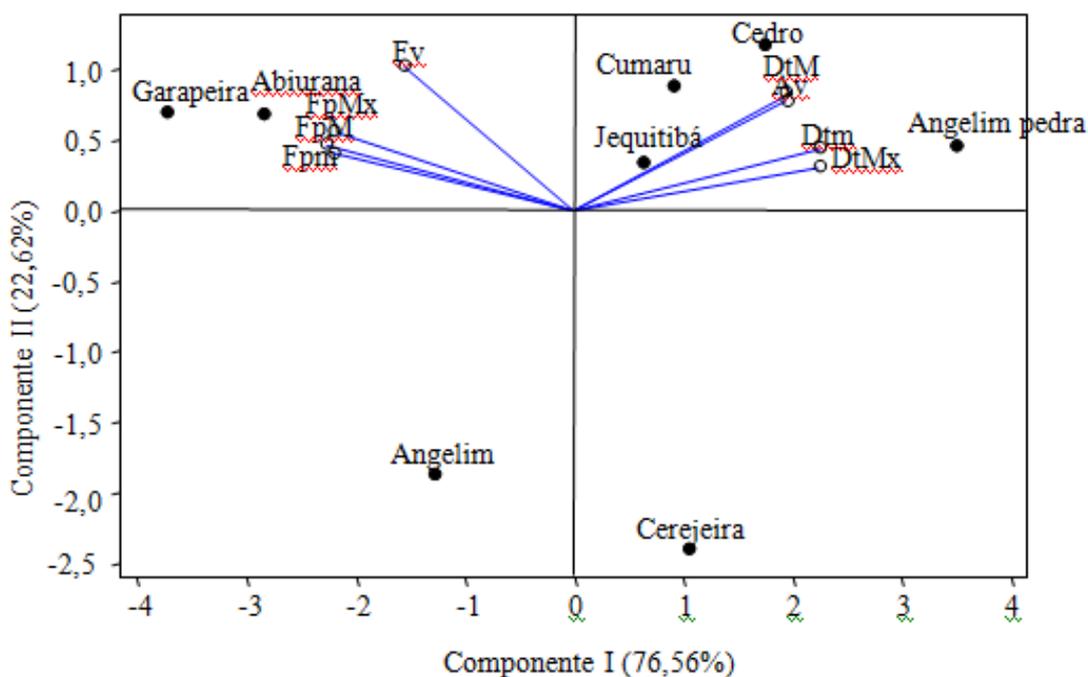
A Tabela 5 apresenta os valores, em módulo, das componentes principais I e II. A quantidade de informação total das variáveis retidas pelas duas componentes principais foi de 99,18% em que 76,56% correspondem à componente principal I e 22,62% à componente principal II. Os maiores vetores observados na componente principal I são para as variáveis de frequência média dos vasos ( $FpM = -0,386$ ), diâmetro tangencial mínimo dos vasos ( $Dtm = 0,381$ ) e diâmetro tangencial máximo dos vasos ( $DtMx = 0,380$ ), indicando que estas são as mais importantes para agrupar as espécies de madeiras. Observando o diagrama de ordenação (Figura 9), no lado negativo da componente principal I, a variável  $FpM$  separa as madeiras de abiurana e garapeira das demais, as quais apresentam os maiores valores de frequência média de vasos (Tabela 4). No lado positivo da componente principal I, as variáveis  $Dtm$  e  $DtMx$  agrupam as madeiras de cedro, angelim pedra, cumaru e jequitibá as quais apresentam vasos de maiores diâmetros (Tabela 4). Na componente principal II, o diâmetro tangencial médio dos vasos ( $DtM = 0,45$ ) e área dos vasos ( $Av = 0,43$ ) foram as variáveis que mais se aproximaram das madeiras de cedro, angelim pedra, cumaru e jequitibá, indicando que as mesmas apresentam características para agrupar as espécies. De forma isolada, nenhuma das variáveis permitiu o agrupamento das madeiras de angelim e cerejeira às demais madeiras como pode ser observado na ordenação (Figura 9).

É possível estabelecer que as madeiras amazônicas estudadas estão divididas em três grupos: grupo I formado pelas madeiras jequitibá, cedro, angelim pedra e cumaru (madeiras

com os maiores valores de diâmetro tangencial médio dos vasos); grupo II formado pelas madeiras de garapeira e abiurana (maiores valores de frequência média dos vasos) e grupo III formado pelas madeiras de angelim e cerejeira (que não apresentam características de diâmetro tangencial de vasos e frequência dos vasos que relacione com as demais madeiras).

**Tabela 5.** Autovetores das componentes principais I e II obtidas pela análise da componente principal (PCA).

Variável	Componente I	Componente II
Diâmetro tangencial mínimo dos vasos (Dtm)	0,381	0,239
Diâmetro tangencial médio dos vasos (DtM)	0,325	0,448
Diâmetro tangencial máximo dos vasos (DtMx)	0,380	0,172
Frequência mínima dos vasos (Fpm)	-0,375	0,224
Frequência média dos vasos (FpM)	-0,386	0,258
Frequência máxima dos vasos (FpMx)	-0,371	0,305
Área vasos mm <sup>2</sup> (Av)	0,330	0,432
Fração vasos (Fv)	-0,263	0,562
Variância explicada (%)	76,56	22,62
Variância acumulada (%)	76,56	99,18
Autovalores	5,88	1,8



**Figura 9.** Diagrama de ordenação da análise da componente principal (PCA). Variáveis: Dtm = diâmetro tangencial mínimo dos poros, DtM = diâmetro tangencial médio dos poros, DtMx = diâmetro tangencial máximo dos poros, Fpm = frequência mínima dos poros, FpM = frequência média dos poros, FpMx = frequência máxima dos poros, Av = área dos vasos e Fv = fração vasos.

A Figura 10 apresenta o percentual da avaliação visual das superfícies aplainadas e lixadas das madeiras amazônicas segundo a classificação dada pela norma ASTM D 1666-2011. As Figuras 11-18 apresentam as imagens de MEV das superfícies aplainadas e lixadas das madeiras estudadas. De forma geral, o lixamento melhorou a qualidade visual das superfícies, em que foram encontrados maiores percentuais de superfícies classificadas como excelente (nota 1) e boa (nota 2) na superfície lixada; e maiores percentuais entre as classes boa (nota 2) e ruim (nota 4) na superfície aplainada. Hernández e Cool (2008) afirmam que superfícies lixadas são caracterizadas por camadas de células esmagadas na superfície e na subsuperfície, lumens obstruídos pelo pó gerado no lixamento assim como arranhões e paredes celulares arrancadas. Ao observar as imagens do MEV, estas características são bem evidenciadas nas madeiras de textura fina (Figuras 11-13), mostrando que tais aspectos da superfície variam em função das características anatômicas (textura e orientação da grã) de cada espécie.

A madeira de abiurana foi a única que apresentou uma superfície livre de defeitos (nota 1), independentemente do tipo de preparo (aplainada ou lixada) (Figura 10). Entretanto, as notas para a superfície aplainada da madeira de abiurana variam de 1 (excelente) à 4 (ruim). Após o lixamento, a abiurana apresentou um maior percentual nas classes 1 (27%) e 2 (53%) e menor percentual nas classes 3 (13%) e 4 (7%). Nas imagens do MEV, observa-se que o lixamento melhorou a qualidade da superfície da abiurana reduzindo a presença de grã felpuda causada pelo levantamento das fibras e de tiloses nos vasos (Figura 11).

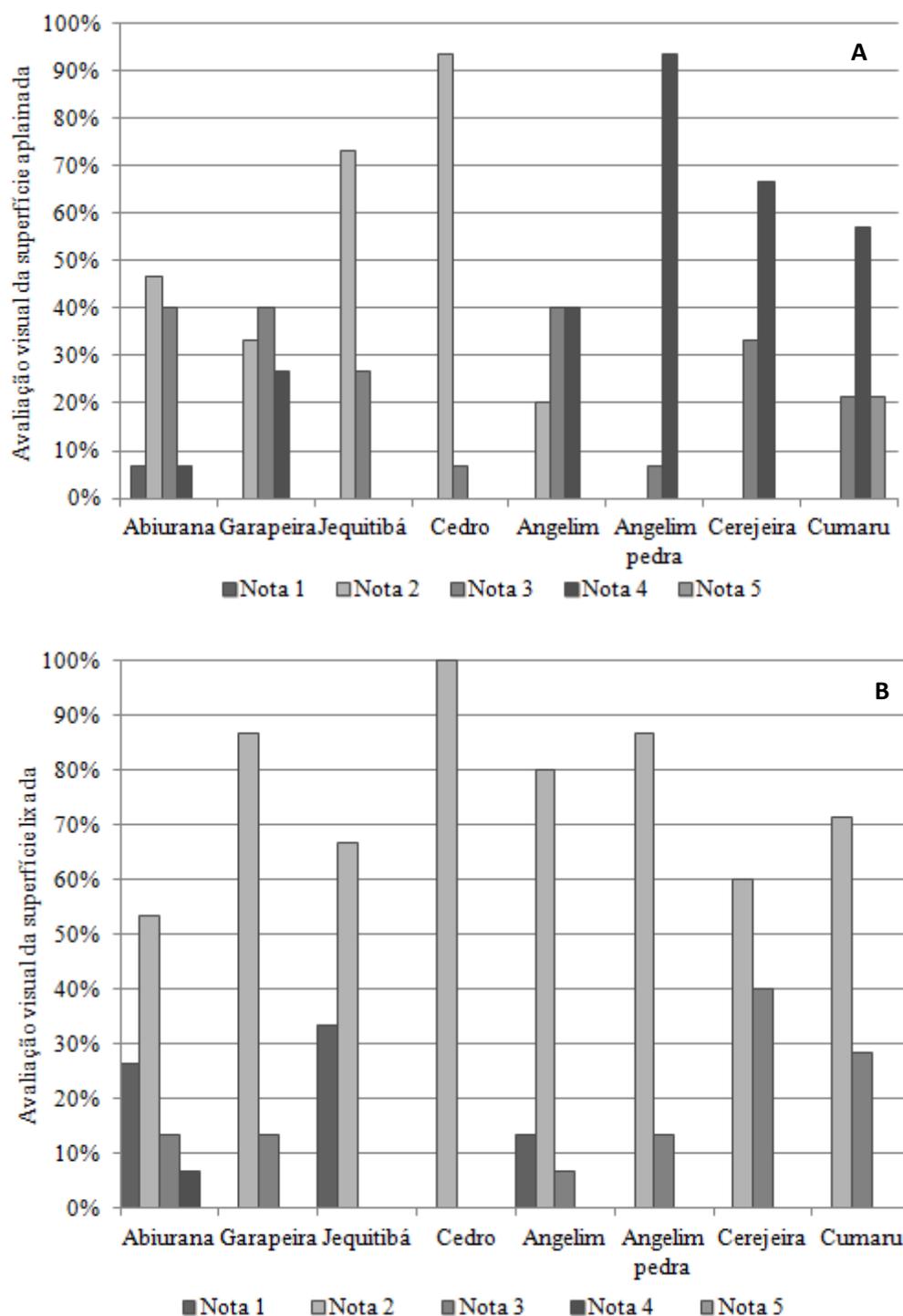
Na madeira de garapeira, as superfícies aplainadas foram classificadas como boa (nota 2), regular (nota 3) e ruim (nota 4). Entretanto, após o lixamento, as superfícies da madeira de garapeira foram classificadas como boa (87%) e regular (13%). O aspecto geral das superfícies aplainadas e lixadas da madeira de garapeira é apresentado na Figura 12.

As madeiras de jequitibá e cedro apresentaram as melhores condições na superfície aplainada, mesmo não apresentando a classe excelente (nota 1) (Figura 10). Entretanto, após o lixamento, a madeira de jequitibá apresentou superfícies classificadas como excelente (nota 1) e boa (nota 2) com 33% e 67%, respectivamente. Já a madeira de cedro foi classificada como boa (nota 2) em 100% das amostras. A madeira de jequitibá apresentou poros completamente obstruídos por tiloses (Figura 13).

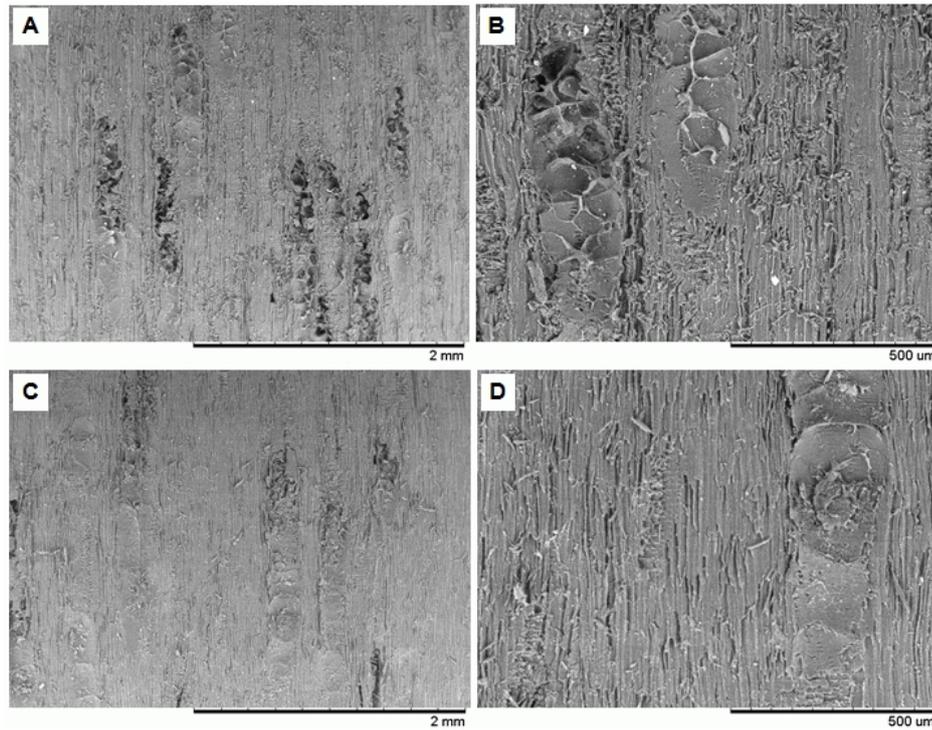
A superfície aplainada do angelim foi classificada como boa (20%), regular (40%) e ruim (40%), entretanto, após o lixamento, as superfícies foram classificadas como excelente (13%), boa (80%) e regular (7%) (Figura 10).

As superfícies aplainadas das madeiras de angelim pedra e cerejeira foram classificadas como regular (nota 3) e ruim (nota 2), sendo a maioria das amostras classificadas como ruins (Figura 10). Após o lixamento, a maioria das amostras de angelim pedra e cerejeira foram classificadas como boas (nota 2) com 87% e 60%, respectivamente.

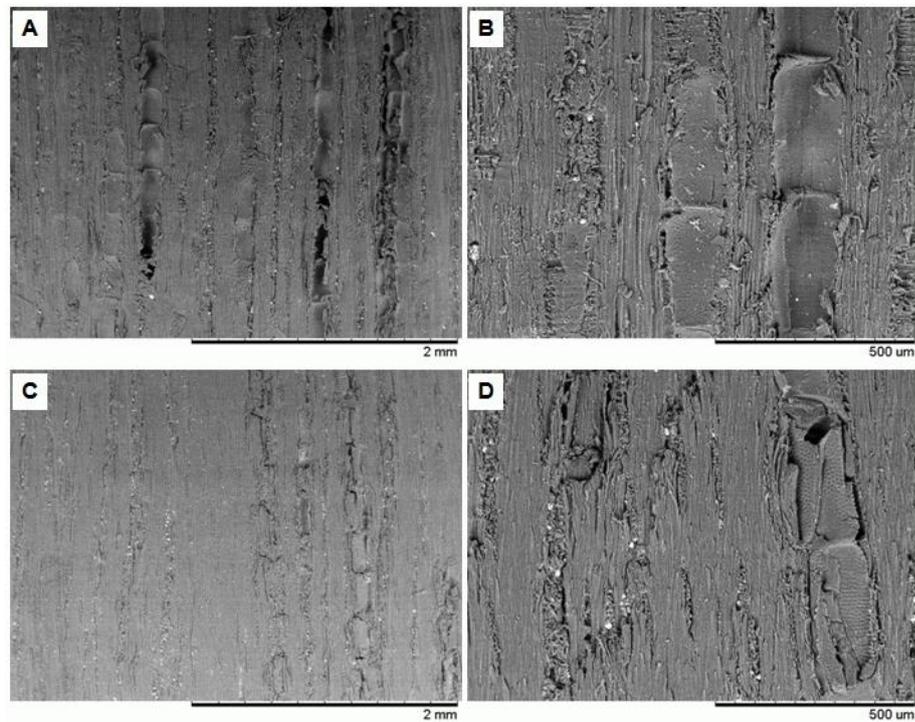
A madeira de cumaru foi a única a apresentar uma superfície classificada como muito ruim (nota 5) com 21,5% na superfície aplainada, sendo o restante das amostras classificadas como regular (21,5%) e ruim (57%). Isso ocorre devido ao fato da madeira de cumaru apresentar grã irregular (reversa) e textura grossa com cavidades profundas causadas pelas linhas vasculares (Figura 18). Após o lixamento, a qualidade da superfície do cumaru foi classificada como boa (71%) e regular (29%) (Figura 10).



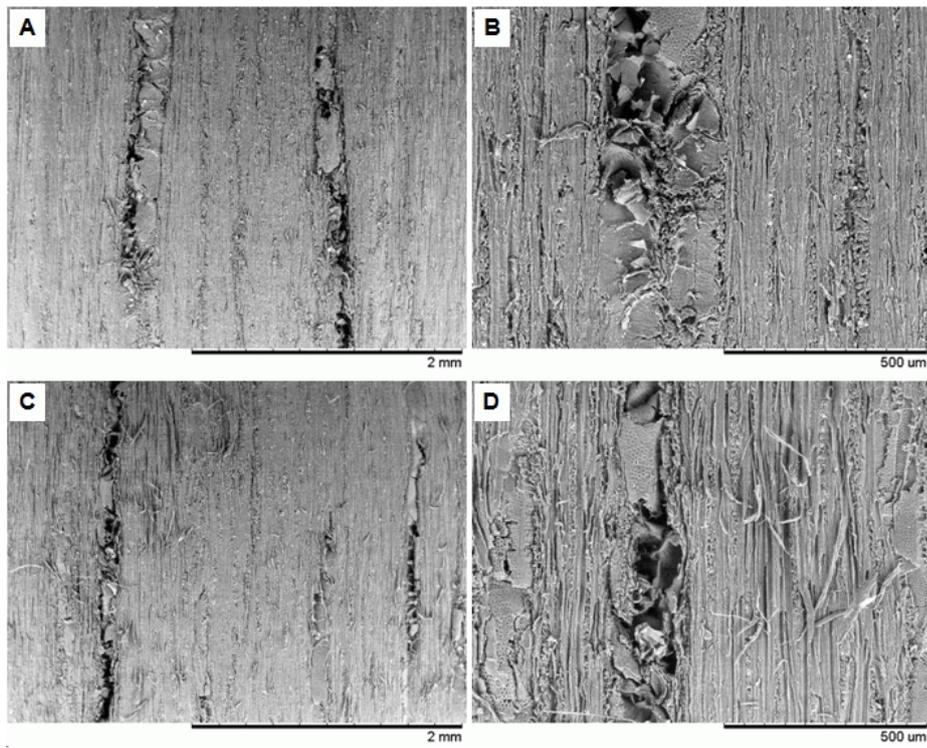
**Figura 10.** Avaliação visual da qualidade das superfícies aplainada (A) e lixada (B) das madeiras amazônicas segundo a norma ASTM D 1666-2011. Classificação das notas: 1 = excelente, 2 = boa; 3 = regular; 4 = ruim e 5 = muito ruim.



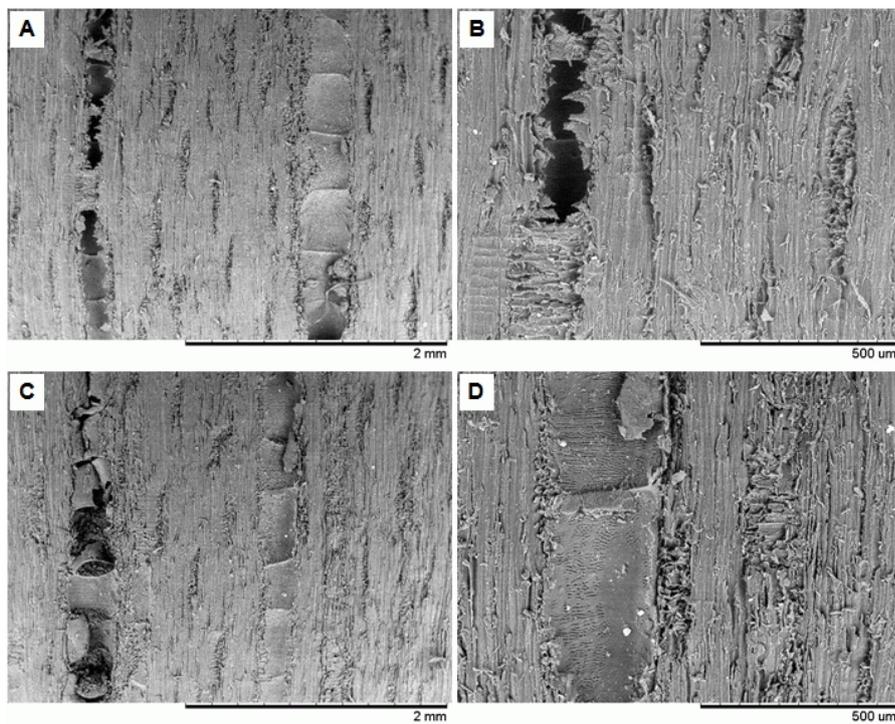
**Figura 11.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de abiuarana (textura fina).



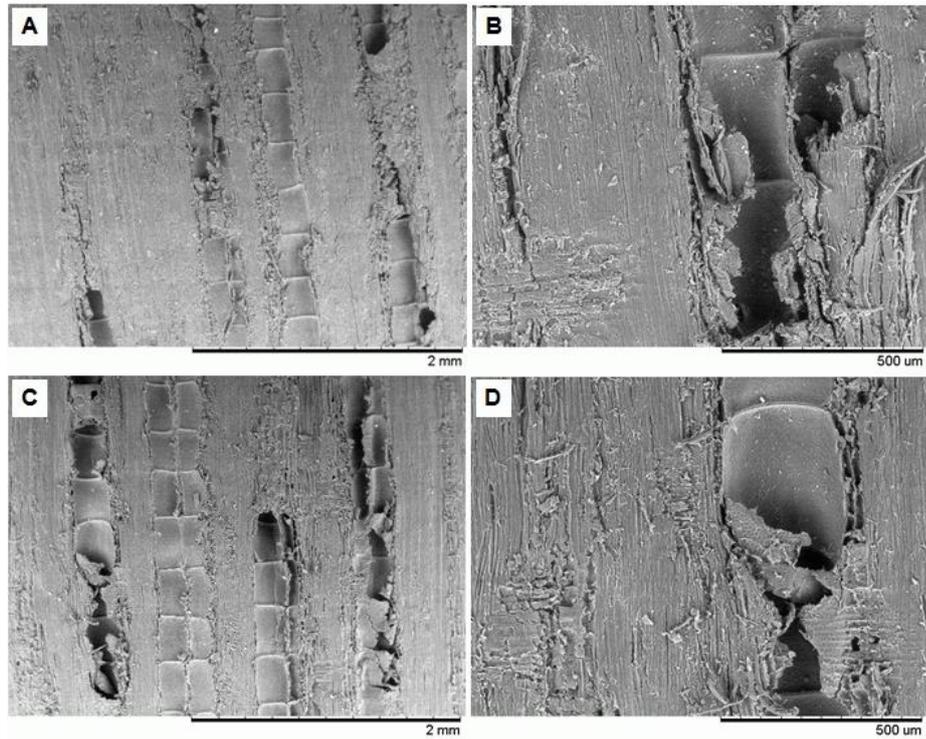
**Figura 12.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de garapeira (textura fina).



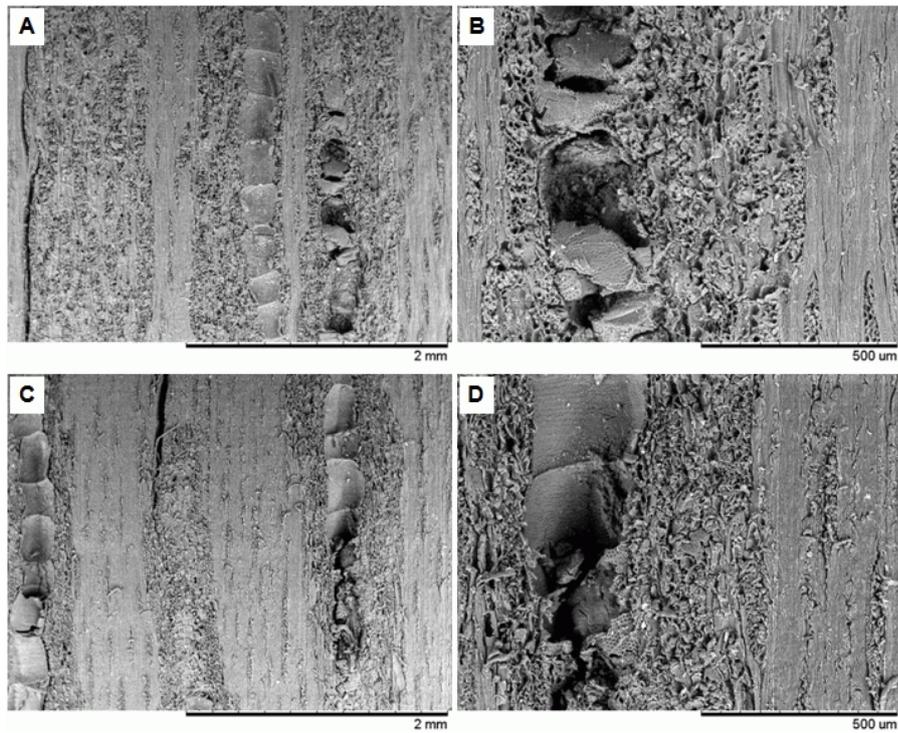
**Figura 13.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de jequitibá (textura fina).



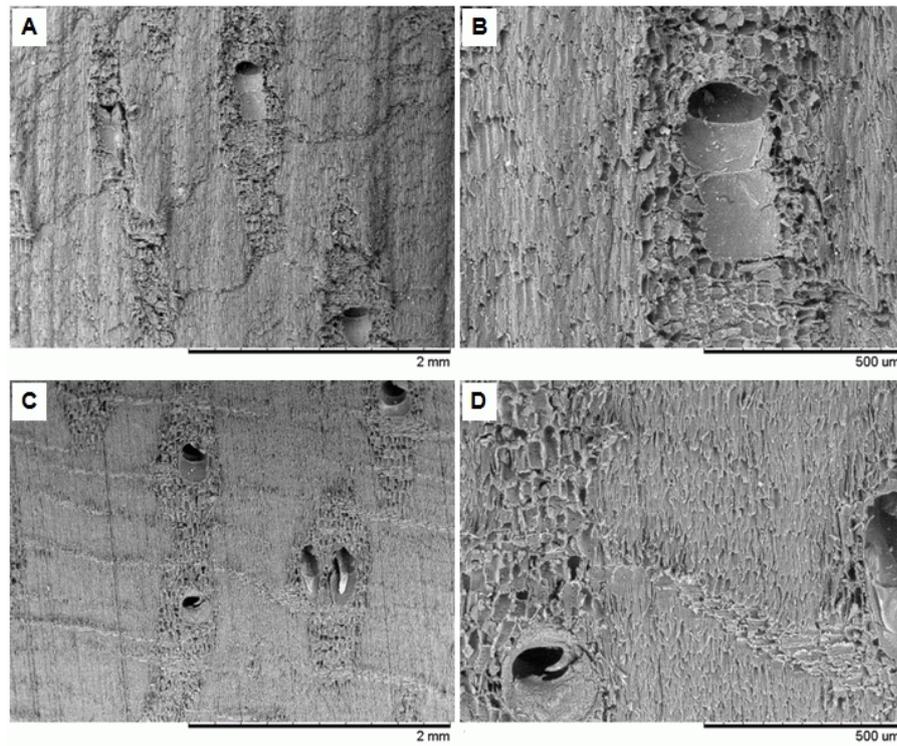
**Figura 14.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de cedro (textura média).



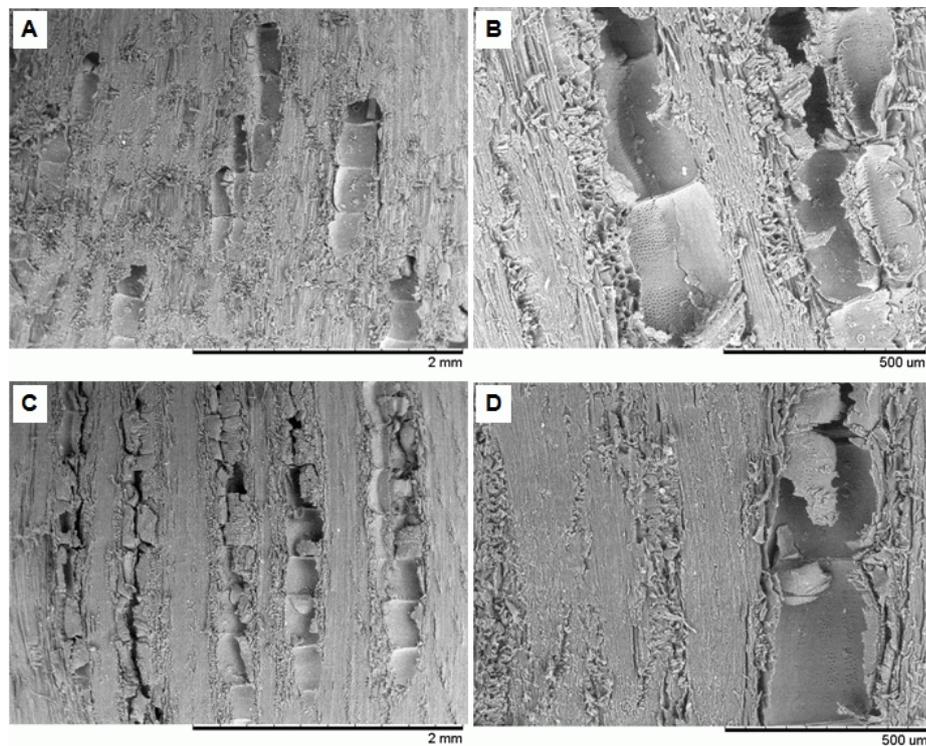
**Figura 15.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de angelim (textura grossa).



**Figura 16.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de angelim pedra (textura grossa).



**Figura 17.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de cerejeira (textura grossa).



**Figura 18.** Imagens do MEV das superfícies aplainada (A-B) e lixada (C-D) da madeira de cumaru (textura grossa).

## 4.2 Rugosidade superficial

A Tabela 6 apresenta as médias de densidade aparente e dos parâmetros de rugosidade superficial das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície e das classes de textura. A Tabela 7 apresenta as médias dos postos de Kruskal-Wallis dos parâmetros de rugosidade superficial em função das classes de textura das madeiras nas faces aplainada e lixada.

### *Rugosidade média – $R_a$*

O parâmetro  $R_a$  apresentou diferenças significativas entre as superfícies aplainadas e lixadas para todas as madeiras estudadas (Tabela 6). A superfície lixada apresentou menor  $R_a$  que a superfície aplainada, independente da espécie (Figura 19). Isso ocorre porque o lixamento uniformiza a superfície e minimiza a influência da estrutura anatômica (de MOURA; HERNANDEZ, 2005).

Na superfície aplainada, a madeira de cerejeira apresentou a maior  $R_a$ , entretanto não se diferenciaram estatisticamente das madeiras de abiurana, garapeira, cedro e cumaru (Figura 19). A madeira de jequitibá apresentou a menor  $R_a$ , entretanto, não se diferenciou das madeiras de angelim e angelim pedra (Figura 19).

Na superfície lixada, a cerejeira apresentou a maior  $R_a$ , não se diferenciando estatisticamente das madeiras de angelim, cedro e cumaru. Entretanto, a cerejeira diferenciou-se da madeira de garapeira, a qual por sua vez, apresentou uma  $R_a$  similar àquela das madeiras de jequitibá e abiurana.

Na Tabela 7, observa-se que a textura da madeira apresenta um efeito significativo na  $R_a$  das duas condições de preparo. Na superfície aplainada, as madeiras de textura grossa apresentaram os maiores valores de  $R_a$ , enquanto que as madeiras de textura fina e média não se diferenciam estatisticamente entre si. Na superfície lixada, o efeito da textura na  $R_a$  é mais perceptível em que as madeiras de textura fina (abiurana, garapeira e jequitibá) apresentaram os menores valores de  $R_a$ , diferenciando-se das madeiras de textura média e grossa (Figura 19). Esses resultados corroboram com aqueles observados por Thoma et al. (2015), em que as madeiras de textura fina apresentaram menor rugosidade superficial que as madeiras de textura grossa. Segundo Thoma et al. (2015), em superfícies lixadas a diferença entre os parâmetros de rugosidade superficial é explicada pela textura da madeira e sua uniformidade em relação ao tamanho e distribuição dos poros.

As madeiras estudadas apresentaram densidades aparentes médias variando entre  $0,575 \text{ g.cm}^{-3}$  (cedro) e  $0,974 \text{ g.cm}^{-3}$  (angelim); entretanto nenhuma correlação foi encontrada entre a densidade e os parâmetros de rugosidade. Alguns autores afirmam que madeiras com maiores densidades produzem superfícies mais lisas após a usinagem e, conseqüentemente, menores valores de  $R_a$ . Teles, Costa e Souza (2016) encontraram uma correlação negativa entre a densidade aparente e os parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  para a madeira de cumaru em que a qualidade da superfície foi melhor para as peças de madeira de maior densidade.

Menores valores de rugosidade superficial é uma característica desejável para madeiras destinadas à produção de móveis, por possibilitar uma superfície mais homogênea para aplicação de revestimentos. Entretanto, essa característica da superfície não deve ser vista isoladamente para que a madeira seja ou não apta para produção de móveis.

**Tabela 6.** Valores médios dos parâmetros de rugosidade superficial das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície e das classes de textura.

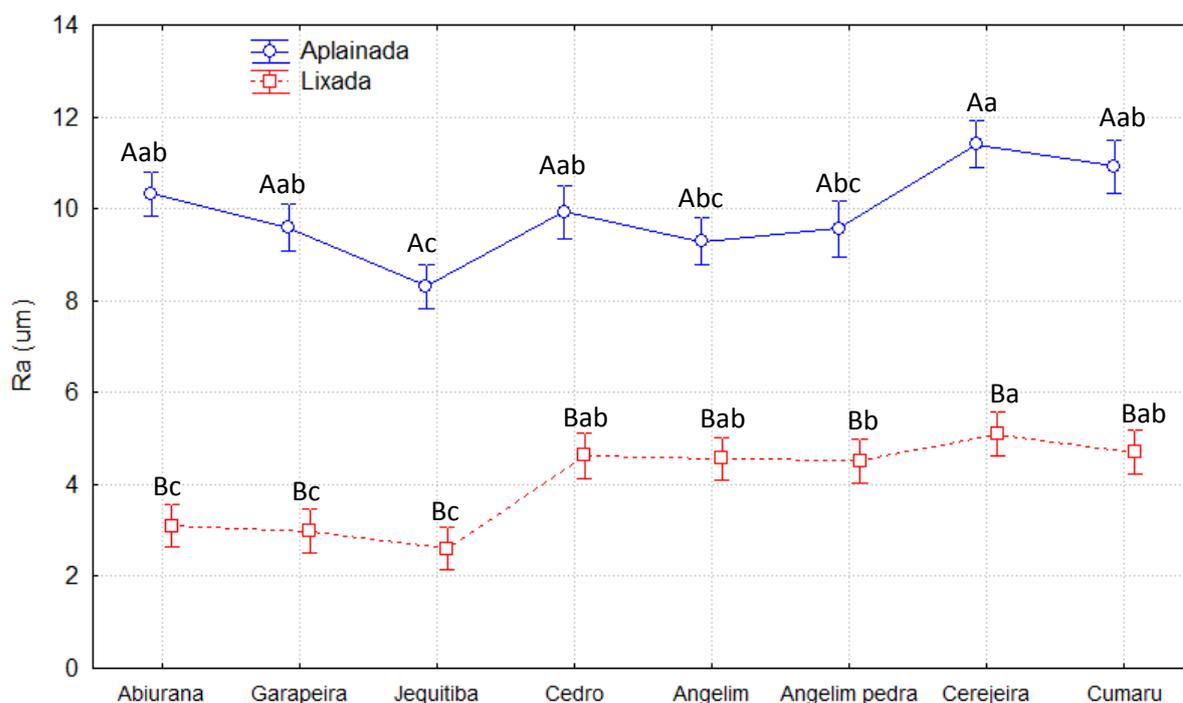
Textura	Espécie	Densidade aparente 12% (g.cm <sup>-3</sup> )	R <sub>a</sub> (μm)		R <sub>z</sub> (μm)		R <sub>t</sub> (μm)		R <sub>p</sub> (μm)		R <sub>v</sub> (μm)	
			Aplainada	Lixada	Aplainada	Lixada	Aplainada	Lixada	Aplainada	Lixada	Aplainada	Lixada
Fina	Abiurana	0,606 [91,33] e	10,3 Aab [266,6]	3,1 Bc [203,7]	67,3 Aa [266,4]	26,7 Bc [194,1]	79,0 Aab [278,3]	32,0 Bcd [191,2]	26,6 Aa [240,0]	9,8 Bb [212,0]	40,7 Aa [281,7]	17,0 Bcd [201,9]
	Garapeira	0,911 [424,03] b	9,6 Aab [236,0]	3,0 Bc [176,0]	64,0 Aab [241,2]	31,3 Bbc [258,0]	75,2 Aabc [249,9]	39,1 Bbc [265,2]	27,3 Aa [240,4]	9,0 Bb [163,1]	36,8 Aa [247,0]	22,3 Bbc [286,7]
	Jequitibá	0,703 [185,83] d	3,3 Ac [155,5]	2,6 Bc [119,9]	58,9 Ab [194,0]	23,5 Bc [139,5]	70,0 Abcd [213,3]	28,6 Bd [147,5]	22,6 Ab [153,9]	9,0 Bb [167,8]	36,3 Aab [227,4]	14,5 Bd [146,4]
Média	Cedro	0,575 [67,83] e	9,9 Aab [241,7]	4,6 Bab [365,3]	64,1 Aab [230,2]	40,9 Ba [354,3]	76,3 Aabc [245,5]	51,4 Bab [342,8]	26,4 Aa [237,9]	12,0 Ba [335,3]	37,7 Aab [235,4]	28,9 Bab [351,5]
Grossa	Angelim	0,974 [521,82] a	9,3 Abc [214,9]	4,6 Bab [358,7]	65,3 Aab [251,9]	40,7 Ba [349,7]	80,6 Aa [288,7]	53,2 Ba [357,4]	26,7 Aa [231,4]	12,7 Ba [370,6]	38,6 Aa [254,5]	28,0 Bab [336,0]
	Angelim pedra	0,839 [334,17] bc	9,6 Abc [212,1]	4,5 Bb [325,2]	61,7 Aab [206,0]	42,6 Bab [332,9]	61,7 Ad [150,9]	55,9 Aab [338,0]	30,3 Aa [284,2]	12,4 Ba [338,4]	31,4 Ab [157,6]	30,2 Aab [327,8]
	Cerejeira	0,766 [260,83] cd	11,4 Aa [301,7]	5,1 Ba [435,0]	65,7 Aab [247,4]	39,1 Bab [341,4]	65,7 Acd [181,2]	48,6 Bab [321,6]	28,1 Aa [263,3]	13,3 Ba [404,7]	37,5 Aab [231,9]	25,9 Bab [322,4]
	Cumaru	0,968 [510,20] a	10,9 Aab [286,8]	4,7 Bab [376,7]	67,0 Aab [261,3]	45,8 Ba [391,1]	78,9 Aab [274,8]	57,8 Ba [396,9]	29,9 Aa [290,2]	12,4 Ba [366,2]	37,0 Aab [234,7]	33,4 Aa [387,6]

Valores entre colchetes = média dos postos obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0.05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (dentro da espécie). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície. R<sub>a</sub>= rugosidade média, R<sub>z</sub>= rugosidade total, R<sub>t</sub>= rugosidade máxima, R<sub>p</sub>= distância vertical do pico mais alto no comprimento de medição e R<sub>v</sub>= vale mais profundo no comprimento de medição.

**Tabela 7.** Média dos postos de Kruskal-Wallis da rugosidade superficial em função da textura da madeira nas superfícies aplainada e lixada.

Superfície aplainada					
Textura	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>v</sub>
Fina	217,99 b	233,20	246,83	209,35 b	252,26
Média	241,69 b	230,21	245,48	237,87 b	235,41
Grossa	255,21 a	243,34	226,68	264,39 a	223,85
Valor H	7,86*	0,74 <sup>ns</sup>	2,48 <sup>ns</sup>	17,07*	4,56 <sup>ns</sup>
Superfície lixada					
Fina	166,56 b	197,19 b	201,30 b	180,94 b	211,68 b
Média	365,31 a	354,32 a	342,82 a	335,26 a	351,49 a
Grossa	374,35 a	353,34 a	352,89 a	370,36 a	342,84 a
Valor H	205,48**	118,18**	108,51**	163,83**	85,44**

Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si. \*  $P > 0,05$ . \*\*  $P > 0,01$ . <sup>ns</sup> Não significativo. R<sub>a</sub>= rugosidade média, R<sub>z</sub>= rugosidade total, R<sub>t</sub>= rugosidade máxima, R<sub>p</sub>= distância vertical do pico mais alto no comprimento de medição e R<sub>v</sub>= vale mais profundo no comprimento de medição.

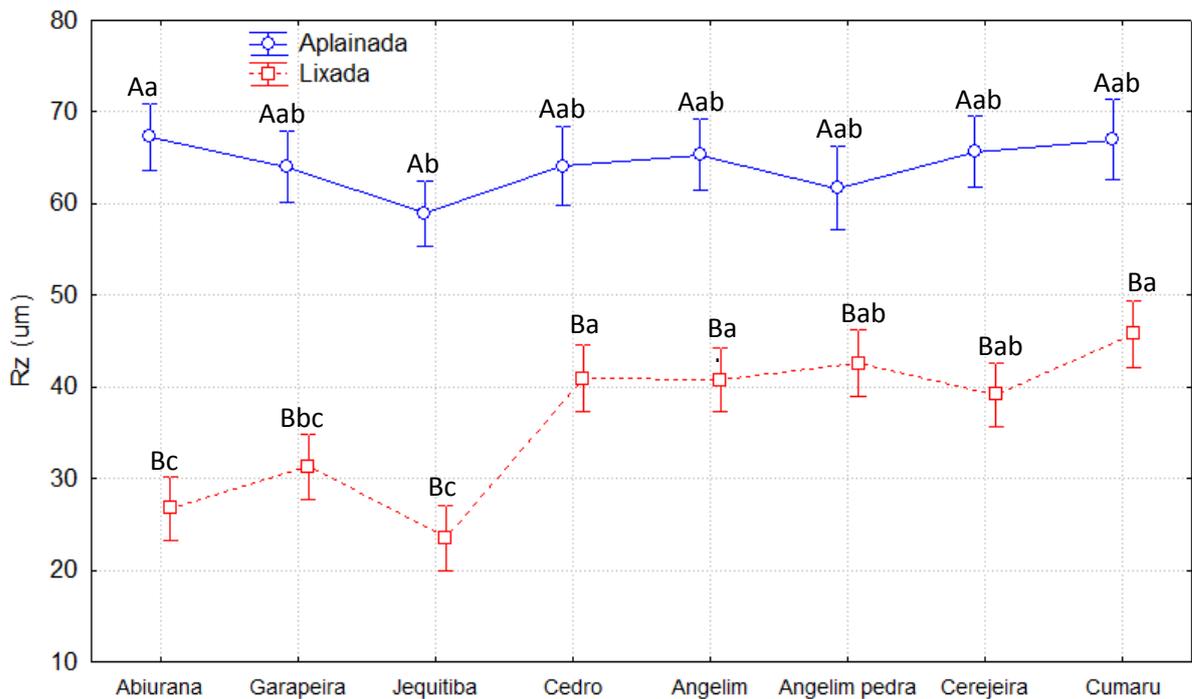


**Figura 19.** Rugosidade média (R<sub>a</sub>) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.

### Rugosidade total – $R_z$

O parâmetro  $R_z$  apresentou diferenças significativas entre as superfícies aplainadas e lixadas para todas as madeiras estudadas (Tabela 6). Na superfície aplainada, a madeira de abiurana apresentou o maior valor absoluto de  $R_z$ , entretanto, ela diferenciou-se somente da madeira de jequitibá (Figura 20). As demais espécies apresentaram  $R_z$  similar às madeiras de abiurana e jequitibá. A textura da madeira não afetou a  $R_z$  da superfície aplainada (Tabela 7). A superfície lixada apresentou uma menor rugosidade média que a superfície aplainada em todas as madeiras (Figura 20).

A classe de textura da madeira afetou significativamente a  $R_z$  das madeiras na superfície lixada (Tabela 7). As madeiras de textura fina (abiurana, garapeira e jequitibá) apresentaram os menores valores de  $R_z$  diferenciando-se das madeiras de textura média e grossa.



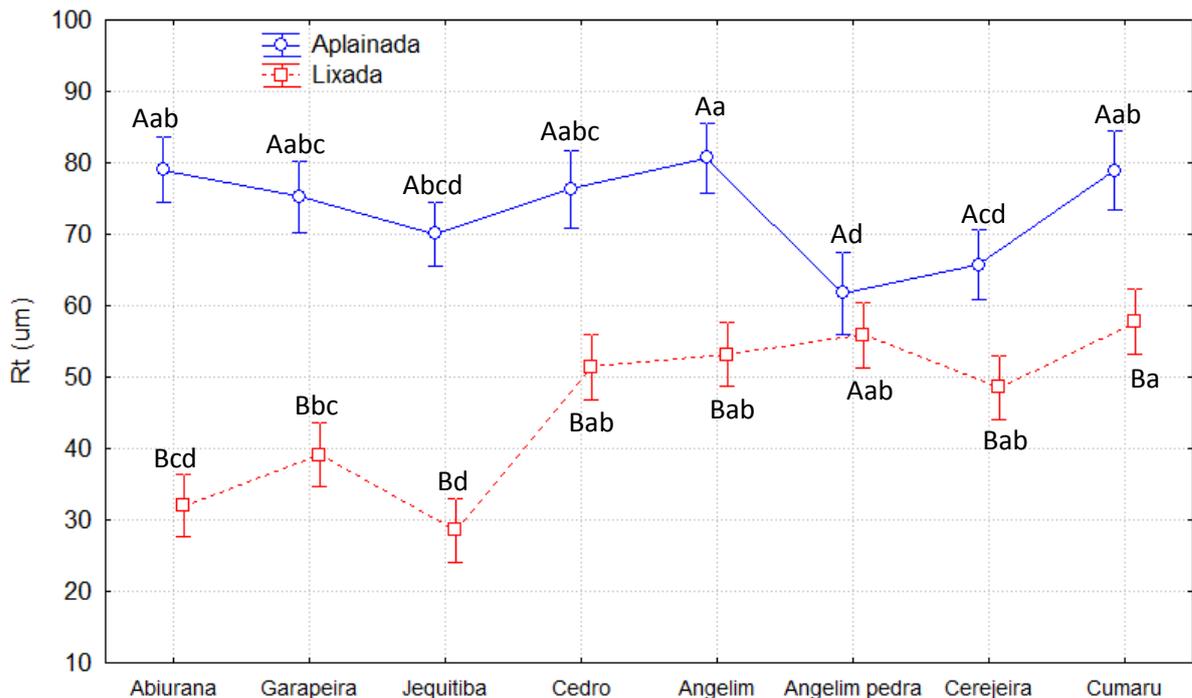
**Figura 20.** Rugosidade total ( $R_z$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.

### Rugosidade máxima – $R_t$

O parâmetro  $R_t$  apresentou diferenças significativas entre as superfícies aplainadas e lixadas para as madeiras estudadas, com exceção da madeira de angelim pedra (Tabela 6 e Figura 21). Neste caso, na superfície lixada foram encontrados os menores valores de  $R_t$  quando comparada a superfície aplainada.

Na superfície aplainada, a madeira de angelim apresentou o maior valor absoluto de  $R_t$ , não diferenciando estatisticamente das madeiras de abiuarana, garapeira, cedro e cumaru. A madeira de angelim pedra apresentou o menor valor absoluto de  $R_t$ , entretanto, não diferenciou-se das madeiras de jequitibá e cerejeira. A textura da madeira não afetou a  $R_t$  da superfície aplainada (Tabela 7).

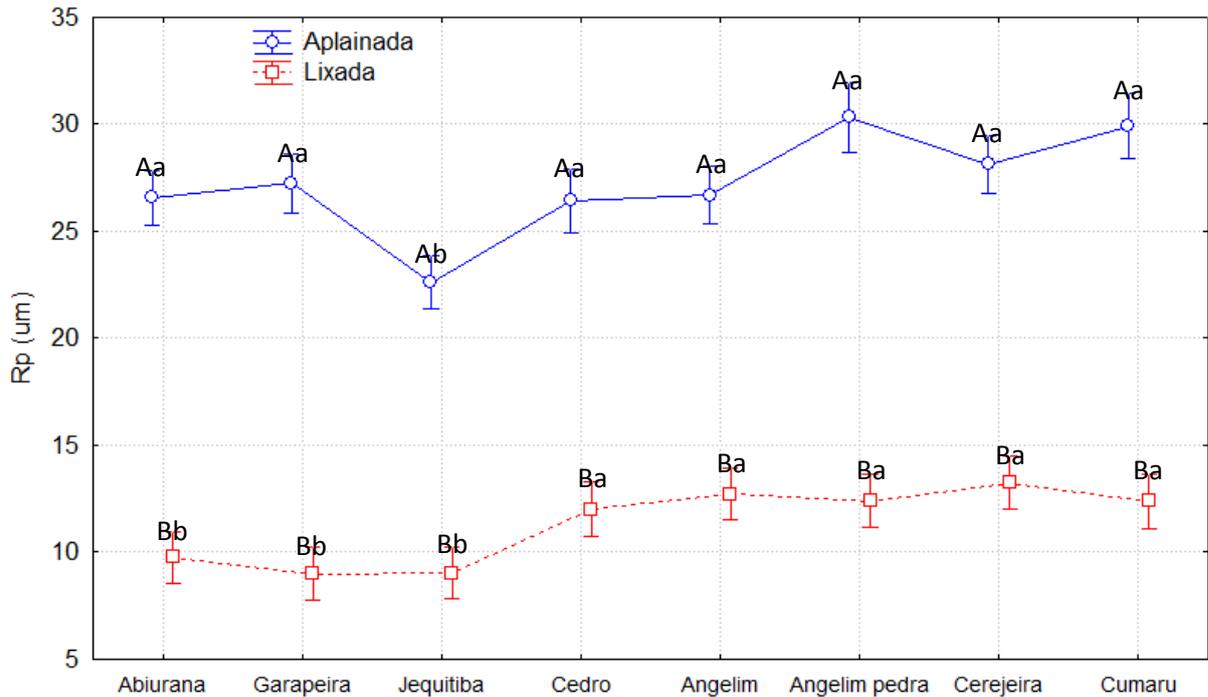
Na superfície lixada, a textura afetou os valores de  $R_t$  em que as madeiras de textura fina apresentam os menores valores (Tabela 7). As madeiras de textura média (cedro) e grossa (angelim, angelim pedra, cerejeira e cumaru) não se diferenciaram-se entre si (Figura 21). Na classe de textura fina, a madeira de jequitibá apresentou a menor  $R_t$ . O parâmetro  $R_t$  é o maior valor das rugosidades parciais no percurso de medição sendo influenciado pelos parâmetros  $R_p$  e  $R_v$ .



**Figura 21.** Rugosidade máxima ( $R_t$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.

### Rugosidade da amplitude máxima dos picos – $R_p$

O parâmetro  $R_p$  apresentou diferenças significativas entre as superfícies aplainadas e lixadas para todas as madeiras estudadas (Tabela 6). Na superfície aplainada, a madeira de jequitibá apresentou o menor valor de  $R_p$ , diferenciando-se das demais madeiras (Figura 22). Na superfície lixada, observa-se o efeito da textura da madeira no parâmetro  $R_p$ , em que as madeiras de textura fina (abiurana, garapeira e jequitibá) apresentam os menores valores de  $R_p$ , diferenciando-se estatisticamente das demais madeiras.



**Figura 22.** Altura máxima do pico do perfil de rugosidade ( $R_p$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.

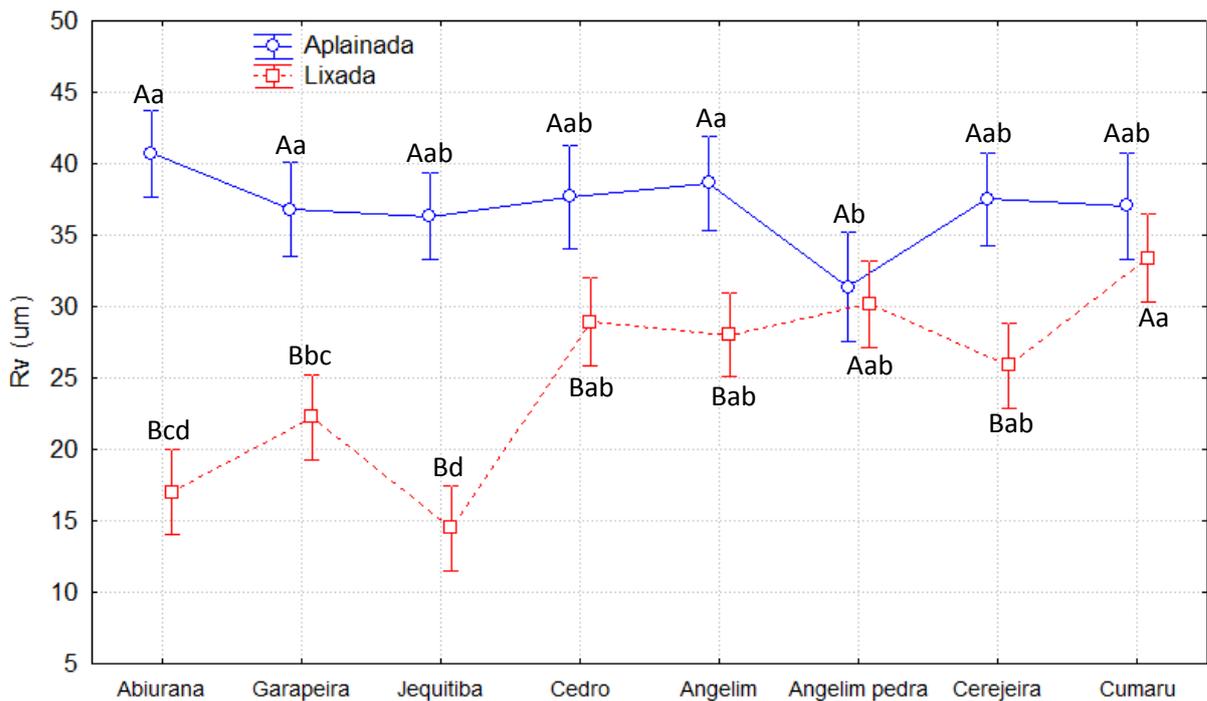
### Rugosidade da amplitude máxima dos vales – $R_v$

O parâmetro  $R_v$  apresentou diferenças significativas entre as superfícies aplainadas e lixadas para as madeiras estudadas, com exceção das madeiras de angelim e cumaru (Tabela 6). A superfície lixada apresentou menor  $R_v$  quando comparada à superfície aplainada, com exceção das madeiras de angelim pedra e cumaru (Figura 23). Avaliando-se os perfis de rugosidade superficial típicos das madeiras de angelim pedra e cumaru (Figuras 24 e 25) nas duas condições de preparo da superfície, observa-se que o lixamento diminuiu os picos, mas não permite eliminar os vales presentes na superfície de ambas as espécies. Em madeiras de folhosas, o lixamento pode ocasionar o esmagamento das células, obstruindo os canais formados pelos vasos (DE MOURA; HERNANDEZ, 2005), o que contribui para diminuir a  $R_v$ . Entretanto, em madeiras mais densas tais como o cumaru e o angelim pedra (Tabela 6), há uma maior resistência mecânica dessas células não ocasionando essa obstrução. Segundo Magoss e Gurau (2008), Mansfield-Williams e Irle (2005), em madeiras mais duras, a

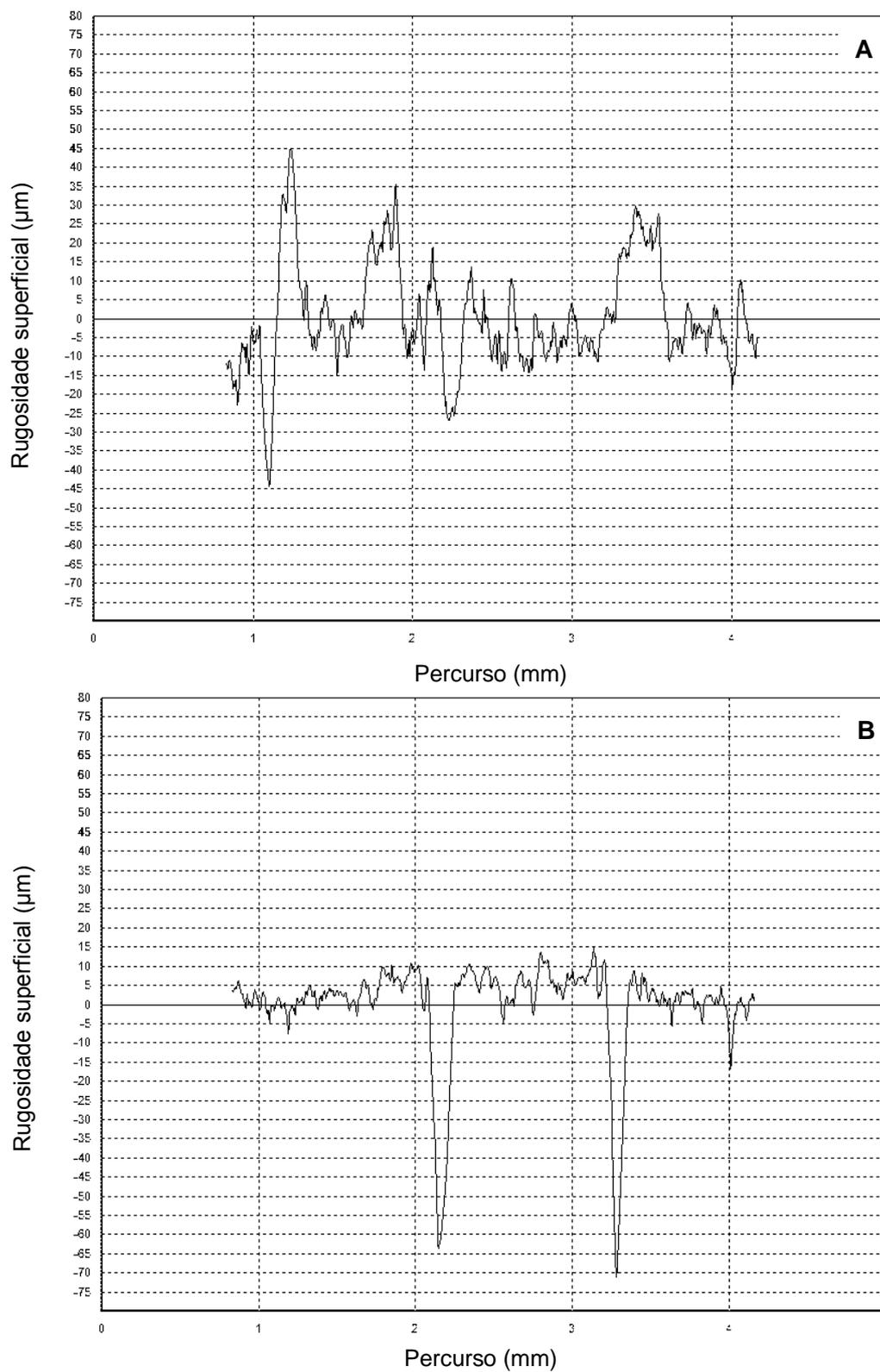
presença de vasos grandes e múltiplos interferem na rugosidade superficial devido à presença de vales profundos. De forma similar, observa-se no nosso estudo que as madeiras de angelim pedra e cumaru apresentaram diâmetros de vasos classificados como grandes e presença de vasos múltiplos, o que explicaria o fato do lixamento não interferir no parâmetro  $R_v$ , não ocasionando o entupimento desses elementos com o pó de lixa gerado no processo. Além disso, as análises de PCA agruparam as essas duas espécies em relação ao diâmetro dos poros (Figura 9).

Na superfície aplainada, a madeira de angelim pedra apresentou o menor valor absoluto de  $R_v$ , diferenciando-se somente das madeiras de jequitibá, cedro, cerejeira e cumaru. A textura não afetou a  $R_v$  para a superfície aplainada (Figura 23). O parâmetro  $R_v$  foi influenciado mais pela frequência de vasos (poros/mm<sup>2</sup>) do que pelo diâmetro tangencial do lúmen dos vasos, pois a madeira de angelim pedra apresentou o maior diâmetro tangencial médio e a menor média de frequência de poros.

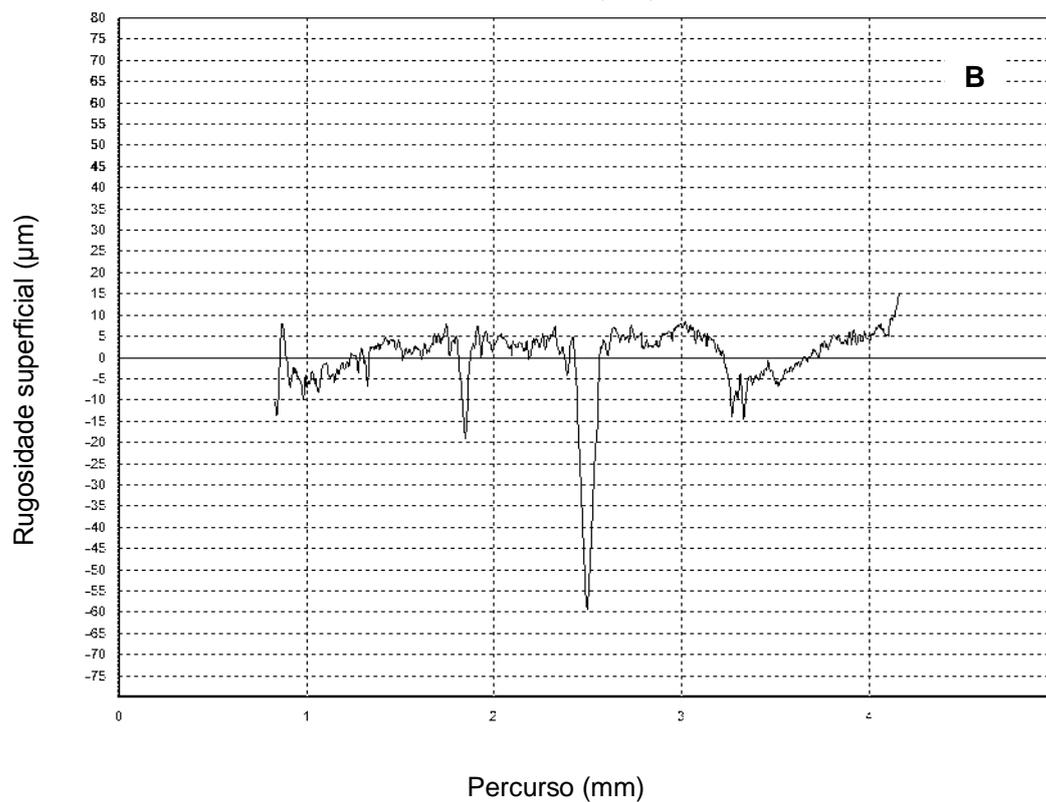
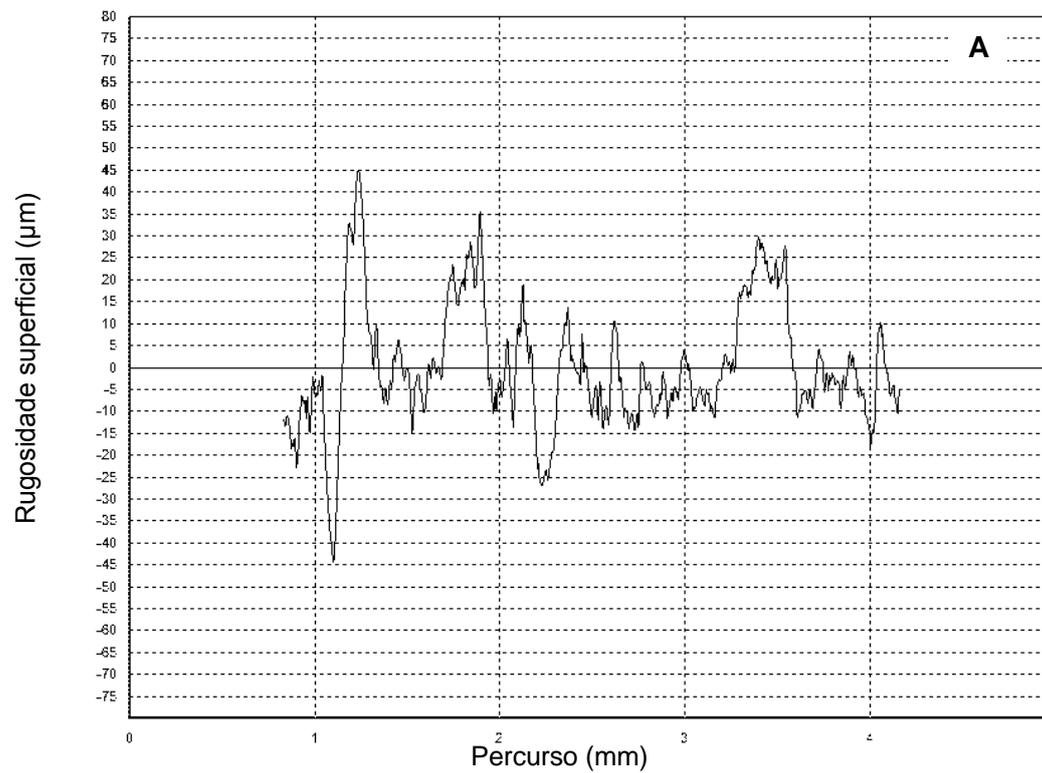
A textura afetou o parâmetro  $R_v$  na superfície lixada (Tabela 7). As madeiras de textura fina apresentaram os menores valores de  $R_v$ , quando comparadas às madeiras de textura média e grossa. Entretanto, o  $R_v$  da madeira de garapeira foi estatisticamente diferente somente das madeiras de cumaru, com maior valor absoluto de  $R_v$ , e jequitibá, com menor valor absoluto de  $R_v$  (Figura 23). De forma geral, os resultados mostram que a textura da madeira apresenta um efeito maior nas superfícies lixadas que na aplainada.



**Figura 23.** Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade ( $R_v$ ) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.



**Figura 24.** Perfil de rugosidade superficial típico da madeira de angelim pedra. (A) Superfície aplainada. (B) Superfície lixada.



**Figura 25.** Perfil de rugosidade superficial típico da madeira de cumaru. (A) Superfície aplainada. (B) Superfície lixada.

### 4.3 Correlação entre os parâmetros de rugosidade superficial e a avaliação visual

A Tabela 8 apresenta a correlação entre os parâmetros de rugosidade superficial ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  e  $R_v$ ) e as notas da avaliação visual das superfícies aplainadas e lixadas. Os parâmetros  $R_a$  e  $R_p$  (superfície aplainada) e  $R_a$  (superfície lixada) apresentam uma correlação significativa com a avaliação visual, entretanto, os coeficientes foram muito baixos ( $r = 0,17$ ,  $r = 0,18$  e  $r = 0,12$  respectivamente), mostrando que a avaliação visual pouco correspondeu aos parâmetros de rugosidade superficial.

Fujiwara et al. (2004) e Fujiwara et al. (2005) ressaltam a importância de estudar as correlações entre os parâmetros quantitativos e as avaliações visual e tátil, por serem essas avaliações frequentemente utilizadas nas indústrias de produtos de madeira. No entanto, nem todos os parâmetros de rugosidade superficial se relacionam bem com a avaliação superficial e tátil da superfície da madeira usinada (FUJIWARA et al., 2003). Fujiwara et al. (2005) estudaram a correlação entre os parâmetros de rugosidade ( $R_{pk}$  – região de pico do perfil,  $R_k$  – região de máximo contato e  $R_{vk}$  – região de vale no perfil) com a avaliação tátil da superfície das madeiras de *Quercus mongolica* var. *grosseserrata* e *Fagus crenata* e encontraram uma boa correlação dos parâmetros  $R_{pk}$  e  $R_k$  com a rugosidade tátil da superfície das madeiras.

**Tabela 8.** Correlação entre os parâmetros de rugosidade superficial e a avaliação visual.

Variável	$R_a$	$R_z$	$R_t$	$R_p$	$R_v$
Avaliação visual – superfície aplainada	0,17*	0,06	-0,02	-0,18*	-0,03
Avaliação visual – superfície lixada	0,12*	0,05	0,05	0,08	0,04

\*Significativo  $P > 0.05$ .  $R_a$ = rugosidade média,  $R_z$ = rugosidade total,  $R_t$ = rugosidade máxima,  $R_p$ = distância vertical do pico mais alto no comprimento de medição e  $R_v$ = vale mais profundo no comprimento de medição.

## 5 CONCLUSÕES

A análise da componente principal separou as madeiras em três grupos em que o diâmetro tangencial médio e a frequência média dos poros foram as variáveis mais importantes.

O lixamento diminuiu a rugosidade superficial das madeiras para todos os parâmetros, exceto para o parâmetro  $R_v$  das madeiras de angelim pedra e cumaru, por apresentarem densidades altas e diâmetros tangenciais de vasos grandes.

A textura afetou os parâmetros  $R_a$  e  $R_p$  das superfícies aplainadas e todos os parâmetros de rugosidade na superfície lixada.

As madeiras de textura fina apresentaram menor rugosidade superficial que as madeiras de textura grossa.

A avaliação visual apresentou uma correlação significativa com o parâmetro  $R_a$ , independente do tipo de preparo.

A estrutura anatômica afetou na rugosidade superficial das madeiras nos parâmetros relacionados à profundidade, tendo como destaque a frequência média de poros. A separação dos grupos pela análise da componente principal, das variáveis anatômicas, correspondeu parcialmente ao agrupamento dado pelos valores médios de rugosidade superficial das madeiras amazônicas estudadas.

## **CAPÍTULO II**

### **EFEITO DA RUGOSIDADE, TEXTURA E DENSIDADE NA MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE DE MADEIRAS AMAZÔNICAS**

### **EFFECT OF THE ROUGHNESS, TEXTURE AND DENSITY ON SURFACE WETTING OF AMAZONIAN WOODS**

## RESUMO

A molhabilidade superficial da madeira é um fenômeno complexo que depende das características físico-químicas do material e afeta a qualidade e a durabilidade da adesão e aplicação de revestimentos. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das características físicas (rugosidade superficial, textura e densidade) na molhabilidade superficial de oito espécies de madeiras amazônicas. As madeiras estudadas foram: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) e cumaru (*Dipteryx odorata*). As madeiras foram classificadas de acordo com a textura (fina, média e grossa) e a densidade aparente determinada segundo a norma ASTM D 2395-93. A rugosidade superficial foi determinada pelo rugosímetro de agulha modelo TR 200 segundo a norma NBR ISO 4287:2002 em que foram obtidos os parâmetros de amplitude ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  e  $R_v$ ) nas superfícies aplainadas e lixadas. A molhabilidade superficial foi determinada através de análises de ângulo de contato com o equipamento Drop Shape Analyser DSA 100 com medições a cada 10 s durante 120 s nas superfícies aplainada e lixada. O tipo de preparo (aplainamento x lixamento) afetou o ângulo de contato. Os parâmetros de rugosidade apresentaram correlações significativas e negativas com o ângulo de contato na superfície lixada em que as superfícies mais rugosas apresentaram menor ângulo, provavelmente devido à maior penetração do líquido por capilaridade. A textura afetou a molhabilidade tanto na face aplainada quanto na lixada. A densidade da madeira tem um impacto na molhabilidade superficial, entretanto, esta propriedade não é suficiente para explicar os diferentes comportamentos de molhabilidade entre as espécies dentro de uma mesma classe de textura.

**Palavras chaves:** ângulo de contato, análise de formato da gota, capilaridade, usinagem.

## ABSTRACT

The surface wettability of wood is a complex phenomenon that depends on the physical-chemical characteristics of the material and affects the quality and durability of adhesion and coatings applications. This study aimed to evaluate the effect of physical characteristics (surface roughness, texture and density) on the surface wettability of eight Amazonian wood species. The woods studied were: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) and cumaru (*Dipteryx odorata*). The woods were classified according to the texture (fine, medium and coarse) and apparent density determined according to ASTM D 2395-93 standard. Surface roughness was determined by the needle type roughmeter model TR 200 according to NBR ISO 4287:2002 standard where amplitude parameters ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  and  $R_v$ ) were obtained on the planned and sanded wood surfaces. Surface wettability was determined by contact angle analysis with the Drop Shape Analyzer DSA 100 with measurements every 10 s during 120 s on the planned and sanded wood surfaces. The type of surface preparation (planning x sanding) affected the contact angle. Roughness parameters had significant and negative correlations with the contact angle on the sanded surface in which roughened surfaces had lower angle, probably due to the greater penetration of the liquid by capillarity. Texture affected the wettability in both planned and sanded surfaces. Wood density has an impact on the surface wettability, however, this property is not enough to explain the different wettability behavior among species within the same texture class.

**Keywords:** contact angle, drop shape analysis, capillarity, machining.

## 1 INTRODUÇÃO

As propriedades da superfície da madeira são determinadas por fatores físicos tais como morfologia da parede celular, rugosidade, área de superfície específica, uniformidade e permeabilidade; e fatores químicos que incluem a composição elementar e molecular e os grupos funcionais dos principais constituintes da parede celular (celulose, hemiceluloses e lignina) e das substâncias secundárias (pectinas, extrativos) (TSHABALADA et al., 2005). Os fatores físicos e químicos, por sua vez, afetam a molhabilidade da superfície da madeira que consiste na interação macroscópica de um líquido com uma superfície sólida. Gray (1992) define a molhabilidade como a facilidade e a eficácia com que um líquido se espalha sobre uma superfície sólida, molhando-a. A molhabilidade da superfície é uma propriedade essencial para avaliar a aptidão do material para a adesão e a aplicação de revestimentos.

A madeira é um material com uma estrutura complexa e heterogênea composto por células de diferentes formatos, apresentando cavidades causadas pelos lumens celulares, portanto, além do espalhamento do líquido na superfície, ocorre também a penetração do líquido por capilaridade. Além disso, a distribuição e a composição dos constituintes primários e secundários da madeira variam de acordo com a espécie. O comportamento de molhabilidade na madeira depende, portanto, das propriedades e características intrínsecas à espécie, tais como, densidade, textura, estrutura anatômica, heterogeneidade da superfície, rugosidade, teor de umidade, natureza e teor de extrativos; pelas condições de secagem e usinagem; e pela reação entre o líquido e o sólido (WANG; ZHANG; XING, 2007; LUZ; RIBEIRO; PANDOLFELLI, 2008; MARTINS, 2008). As características da superfície da madeira podem se alterar em função do tempo, do calor e da umidade (FRIHART, 2005). Segundo Frihart e Hunt (2010), a interferência química na superfície da madeira reduz a sua molhabilidade, a qual pode ser devido a causas naturais (migração de extrativos para a superfície da madeira), alteração involuntária (secagem excessiva da superfície da madeira) ou alteração intencional (modificação da madeira). Entre os fatores químicos, os extrativos na superfície da madeira são os principais que contribuem para a inativação da superfície, gerando assim um pobre umedecimento do adesivo (ALBINO; MORI; MENDES, 2012). Santoni e Pizzo (2011) observaram que madeiras de folhosas geralmente apresentam ângulos de contato maiores que as madeiras de coníferas, o que pode ser explicado pela diferente estrutura anatômica e pela presença de terpenos, ácidos graxos e compostos fenólicos que diminuem a sua molhabilidade. Entre os fatores físicos, a rugosidade da superfície é um dos fatores mais importantes para entender o fenômeno de molhabilidade já que ela depende da morfologia celular, das operações de usinagem e da interação entre ambos. Entretanto, a correlação entre a rugosidade e a molhabilidade da superfície da madeira depende de inúmeros fatores associados à característica do material daí a importância em conhecer o efeito da rugosidade na molhabilidade de diferentes espécies. Jaic, Palija e Dordevic (2014) encontraram uma correlação direta entre a rugosidade superficial e adesivos à base de água, onde o aumento da rugosidade proporcionou uma maior adesão com o substrato madeira. A rugosidade não é necessariamente um critério relevante quando utilizada de forma isolada para identificar a superfície ideal para aderência do revestimento (COOL et al., 2011). Thibaut et al. (2015), descrevem que o dano celular e a fibrilação ocasionado na superfície pelo processo de lixamento, são dois outros critérios complementares para a avaliação das propriedades físico-químicas da superfície. Amorim et al. (2013) estudando a molhabilidade de onze madeiras amazônicas, observaram que a aplicação do adesivo fenol-formaldeído na face radial da madeira, em geral, tende a ser mais molhável do que a face tangencial. Isso ocorre devido a disposição horizontal dos raios na face radial formando um caminho que

permite uma maior fluidez do adesivo sobre a superfície da madeira. Soares et al. (2011) avaliando a molhabilidade de madeiras termorretificadas, observaram maiores valores de ângulo de contato para o lenho adulto de *Araucaria angustifolia* em relação ao lenho juvenil; isso ocorreu pelo fato da madeira adulta apresentar uma estrutura mais densa e compacta dificultando a sua molhabilidade.

A molhabilidade pode ser caracterizada através de análises de ângulo de contato que representa uma medida quantitativa do processo de molhabilidade e permite estimar o grau de inativação da superfície no sentido de molhagem e penetração, testando o comportamento de uma simples gota de água na superfície da madeira através de seu espalhamento, definindo a madeira como de boa molhabilidade ou não (FRIHART; HUNT, 2010). O comportamento da gota de um líquido na superfície de um sólido através do fenômeno da molhabilidade superficial se dá pelo espalhamento do líquido (fase inicial), onde o ângulo de contato diminui rapidamente e à medida que o tempo passa essa diminuição ocorre mais lentamente até atingir o equilíbrio (fase de difusão). De acordo com o ângulo de contato da gota formado com o sólido, a superfície pode ser considerada: molhável (hidrofílica) – quando o ângulo de contato é igual a zero, havendo um espalhamento total do líquido; parcialmente molhável – quando o ângulo de contato é menor que 90°; e não molhável (hidrofóbica) – quando o ângulo de contato é maior que 90° (LATTHE et al., 2014; WÄLINDER, 2000).

Existem duas abordagens de determinação do ângulo de contato, o modo estático (ex.: goniômetro) e o dinâmico (ex.: balança de Wilhelmy). No método estático, a gota é depositada na superfície de um sólido e mede-se o ângulo de contato em que o cosseno do ângulo de contato é relatado à energia superficial da amostra pela equação de Young (NGUYEN; JOHNS, 1978 apud TSHABALADA et al., 2005). Entretanto, na equação de Young assume-se que a superfície é quimicamente homogênea e topograficamente lisa (BIOLIN SCIENTIFIC, 2016), o que não ocorre na madeira e ressalta a importância de correlacionar a rugosidade da superfície da madeira com as análises de ângulo de contato. No método dinâmico da balança de Wilhelmy, o ângulo de contato é determinado através de uma balança de precisão que mede a força exercida sobre o sólido quando ele é mergulhado e retirado de um líquido com tensão superficial conhecida (TSHABALALA, 2005). Recentemente, com os avanços tecnológicos, surgiram novos métodos para determinar o ângulo de contato tal como o sistema de análise de formato da gota (DSA – *Drop Shape Analysis*) que permite calcular o ângulo de contato estático e dinâmico; e mensurar a energia superficial de sólidos e a tensão superficial de líquidos (KRÜSS GmbH, 2011; YUAN; LEE, 2013). Na análise de ângulo de contato pelo método DSA no modo estático, a gota é produzida antes da medição e apresenta um volume constante durante a medição, entretanto, o ângulo de contato se altera consideravelmente em função do tempo devido à interação com a superfície do material; e no modo dinâmico, o ângulo de contato é medido enquanto o volume da gota está aumentando (ângulo de contato em avanço) ou diminuindo (ângulo de contato em recuo), em que uma nova área de contorno está constantemente sendo formada durante a medição (KRÜSS GmbH, 2011).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das características físicas (rugosidade superficial, textura e densidade) na molhabilidade da superfície de oito madeiras amazônicas através de análises de ângulo de contato pelo método DSA.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Fatores físicos que afetam a molhabilidade

A densidade da madeira é um indicador para estimar a qualidade de ligação entre a madeira e um adesivo ou revestimento. Madeiras de alta densidade são de difícil ligação adesiva, pois suas paredes espessas e lumens de diâmetro pequeno limitam a penetração do líquido em suas células, sendo necessária maior pressão mecânica para que haja contato entre a superfície de madeira e o adesivo; e normalmente apresentam maiores concentrações de extrativos que contribuem para a inativação da superfície e interferem na cura do adesivo (FRIHART; HUNT, 2010). Amorim et al. (2013) estudaram a rugosidade e a molhabilidade de onze espécies de madeiras tropicais da Amazônia e observaram que o aumento da densidade da madeira causou uma redução significativa na rugosidade e na molhabilidade da superfície.

A textura da madeira influencia diretamente no seu acabamento superficial, ou seja, na aplicação de vernizes, tintas e adesivos (SILVA et al., 2005). Madeiras com textura grosseira absorvem em grande quantidade as substâncias que lhe são aplicadas. Por outro lado, em madeiras com textura fina, de estrutura muito fechada e superfícies lisas, haverá deficiência na absorção dessas substâncias por sua superfície (BURGER; RICHTER, 1991). Para a indústria de acabamento de madeiras, a textura grossa representa um gasto adicional com os polímeros e materiais para colagem sendo muito importante a avaliação prévia da superfície para se alcançar um melhor preparo ou mesmo se definir a escolha de determinadas espécies (SILVA et al., 2005).

A anatomia está entre os principais fatores que determinam as propriedades da superfície da madeira, as quais afetam a adesão e o desempenho dos revestimentos (WILLIAMS, 2010). Segundo Williams (2010), o desempenho do revestimento é afetado pela densidade (densidade total, diferentes densidades do lenho tardio e inicial, proporção de lenho tardio, etc), pelo número e localização dos raios, pelo tamanho e localização dos elementos de vasos, pelo teor de extrativos e pela taxa de crescimento de cada espécie.

A rugosidade da superfície da madeira afeta a molhabilidade devido à força de capilaridade (DENES et al., 2005). A rugosidade representa as irregularidades (picos, depressões, fendas, fibras soltas e outros detritos) da superfície e depende da estrutura celular (ex.: grã, largura dos anéis de crescimento, proporção de lenho tardio e lenho inicial, raios, nós, madeira juvenil e adulta, madeira de reação e estruturas celulares específicas) (DUNDAR et al., 2008); e do método de processamento. Ela está intimamente relacionada com a molhabilidade, pois quanto maior a rugosidade, maior será a hidrofobicidade da superfície (PIAO et al., 2010). A rugosidade e a heterogeneidade da superfície proporcionam alterações na energia superficial, obtendo valores de ângulo de contato diferentes de uma condição de equilíbrio. Esta variação do molhamento é chamada de histerese do ângulo de contato (LUZ et al., 2008). Esses autores relatam que a presença de poros na superfície dos substratos também é um fator agravante que contribui para a histerese do ângulo de contato. Uma rugosidade mais elevada pode afetar a colagem positivamente, uma vez que aumenta a superfície e as regiões para penetração e fixação do adesivo, por outro lado, também pode afetar negativamente pelo contato entre as superfícies a colar ser menor (CRUZ, 2006).

O teor de umidade da madeira é outro fator, imprescindível no processo de colagem da madeira. Altos teores de umidade diminuem a resistência da linha de cola, retarda a cura do adesivo e aumentam o risco de bolhas (CARNEIRO et al., 2007). A umidade da madeira combinada com a água do adesivo influencia na molhagem, no fluxo, na penetração e na cura

do adesivo. Segundo Silva et al. (1999), a utilização da madeira com elevado teor de umidade compromete o acabamento da superfície, pois, após a secagem das peças já acabadas ocorrem rachaduras. Isso deve-se ao fato da madeira apresentar contração, não ocorrendo o mesmo com a película de acabamento. Em geral, madeiras com teores de umidade entre 6 e 14% apresentam ótimas propriedades adesivas enquanto que teores de umidade abaixo de 3% apresentam uma superfície temporariamente resistente à molhagem (FRIHART; HUNT, 2010).

O preparo da superfície da madeira também apresenta um papel importante na molhabilidade. No processo de usinagem, as células da madeira são cortadas por ferramentas e o esmagamento ou a excessiva fragmentação das células tornam as superfícies mecanicamente mais fracas, inibindo a molhagem e a penetração do adesivo (FRIHART, 2013).

O aplainamento da superfície da madeira pode criar diversos tipos de superfícies de ligação, dependendo de como as células foram fragmentadas (FRIHART, 2013). A superfície de ligação muitas vezes são as do lúmen (onde ocorre a penetração do adesivo), especialmente das células do lenho inicial nas coníferas e dos elementos de vasos nas folhosas. A adesão depende do tipo de célula exposta na superfície de ligação. Segundo Frihart (2013), a composição da parede do lúmen pode ser altamente celulósica, se a camada  $S_3$  estiver exposta, ou altamente lignificada, se a camada  $S_3$  estiver coberta pela camada verrugosa, variando a ligação entre o adesivo e a estrutura celular.

O processamento da madeira em diferentes operações de usinagem geralmente resulta em uma estrutura de superfície da madeira irregular, com células danificadas e levantadas (WÄLINDER, 2000). Frihart (2013) descreve que o melhor método na preparação da superfície da madeira é a utilização de lâminas cortantes planares (plainas ou plaina jointer), resultando em uma superfície lisa.

A madeira tem sua superfície relativamente polar que permite uma fácil molhabilidade por adesivos à base de água. Porém, algumas madeiras tropicais que apresentam muitos óleos ou as tratadas com creosoto tornam a superfície de difícil molhabilidade (FRIHART, 2013).

Quando a madeira é sujeita a processos de corte e de secagem, sua água migra para superfície depositando ácidos e resinas hidrofóbicas repelindo a água (KIGUCHI, 1996), algumas técnicas de melhoria da molhagem podem ser usadas como, remoção através de limpeza por solventes, limpeza mecânica ou oxidação (FRIHART, 2013).

## **2.2 Análises de ângulo de contato**

O fenômeno de molhabilidade está relacionado com as manifestações macroscópicas de interações moleculares entre líquidos e sólidos em contato (BERG, 1993). A compreensão desse fenômeno é fundamental no conhecimento de processos como adesão, revestimento e pintura e na previsão da performance entre a madeira e os produtos de acabamento.

A molhabilidade é definida como a capacidade de um líquido de estabelecer um contato íntimo com a superfície da madeira, sendo esta característica muito influenciada pela energia livre da superfície (JENNINGS, 2003). A molhabilidade pode ser caracterizada usando parâmetros termodinâmicos como o ângulo de contato, a energia livre de superfície e o trabalho de adesão.

A energia livre superficial é uma propriedade termodinâmica, tornando-se força motriz para a realização de fenômenos de superfície tais como a molhabilidade e a adesão (KHERWALD, 2009).

O trabalho de adesão é um parâmetro que está relacionado com o nível de interação entre as superfícies em contato (RIBEIRO; PANDOLFELLI, 2008). Ele é definido como o trabalho necessário para separar uma unidade de área da interface sólido-líquido e é dado pela equação de Dupré (CRUZ, 2006):

$$WSL = \gamma_S + \gamma_{LV} + \gamma_{SL} \quad (1)$$

onde:  $WSL$  = trabalho de adesão;  $\gamma_S$  = energia da superfície de um sólido mensurada no vácuo;  $\gamma_{LV}$  = tensão superficial do líquido com seu vapor; e  $\gamma_{SL}$  = energia livre da superfície na interface sólido/ líquido.

A baixa energia livre na superfície da madeira induz as moléculas do líquido a serem atraídas por outras moléculas do mesmo líquido, mais do que pelas moléculas da madeira. Esta situação acarreta a ocorrência de um grande ângulo de contato. Para se ter uma boa molhabilidade, a madeira deve apresentar alta energia superficial, o que leva as moléculas do líquido a serem mais atraídas pelas moléculas de sua superfície (JENNINGS, 2003).

A molhagem da madeira pelos adesivos envolve a formação de um ângulo de contato  $\theta$  na interface sólido/líquido/gás, o espalhamento do adesivo sobre a superfície e a sua penetração na superfície porosa da madeira (CRUZ, 2006).

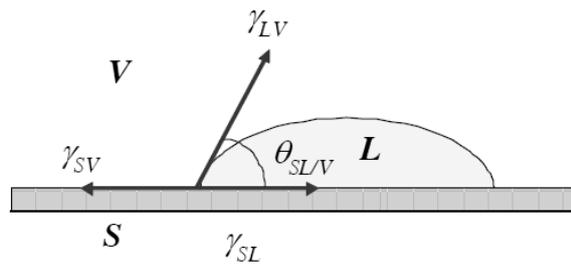
O ângulo de contato representa uma medida quantitativa da molhabilidade e pode ser medido através de dois métodos: estático e dinâmico. O método estático mede o ângulo sólido-líquido de uma gota séssil na superfície da madeira. A Figura 26 apresenta o ângulo de contato,  $\theta$ , de uma gota de um líquido em uma superfície sólida. O ângulo de contato depende das interações entre as interfaces (sólido/ líquido, sólido/ vapor e vapor/ líquido) (TSHABALALA, 2005). A equação de Young representa o balanço das tensões superficiais (energia livre de superfície) para uma gota em equilíbrio para uma superfície ideal e é dada pela seguinte equação:

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_S - \gamma_{SL} - \pi_e \quad (2)$$

onde:  $\gamma_{LV}$  = tensão superficial do líquido com seu vapor;  $\theta$  = ângulo de contato de Young;  $\gamma_{SV}$  = energia livre da superfície na interface sólido-vapor;  $\gamma_{SL}$  = energia livre da superfície na interface sólido-líquido;  $\gamma_S$  = energia da superfície de um sólido mensurada no vácuo; e  $\pi_e$  = pressão de espalhamento em equilíbrio do vapor adsorvido do líquido no sólido, a qual é definida pela diferença entre  $\gamma_S$  e  $\gamma_{SV}$  (NGUYEN; JOHNS, 1978).

Na equação de Young, somente  $\gamma_{LV}$  e  $\cos \theta$  podem ser determinados experimentalmente. Entretanto, o ângulo de contato  $\theta$  pode ser obtido somente quando a tensão superficial do líquido é maior que a energia livre da superfície do sólido (assumindo que  $\gamma_{SL}$  e  $\pi_e$  são aproximadamente igual à zero). Sendo assim, a energia da superfície do sólido pode ser estimada através da seguinte equação:

$$\gamma_S \cong \gamma_{LV} \cos \theta \quad (3)$$



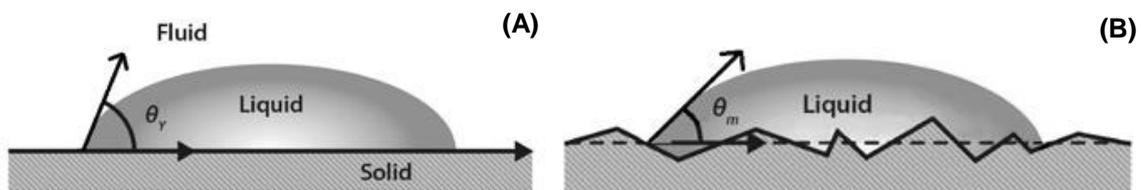
**Figura 26.** Ângulo de contato de Young (CRUZ, 2006).

O modelo de Young foi estabelecido para superfícies limpas e perfeitamente planas. Porém, a madeira apresenta rugosidade em sua superfície devido a sua estrutura e anatomia, além de ser um material poroso e heterogêneo. Wenzel (1936) aperfeiçoou a equação de Young para o caso de superfícies sólidas rugosas, desta forma, o ângulo de contato  $\theta_r$  do líquido sobre o sólido está relacionado com o ângulo de contato teórico  $\theta_0$  (ou intrínseco) através da relação seguinte:

$$r \cos \theta_0 = \cos \theta_r \quad (4)$$

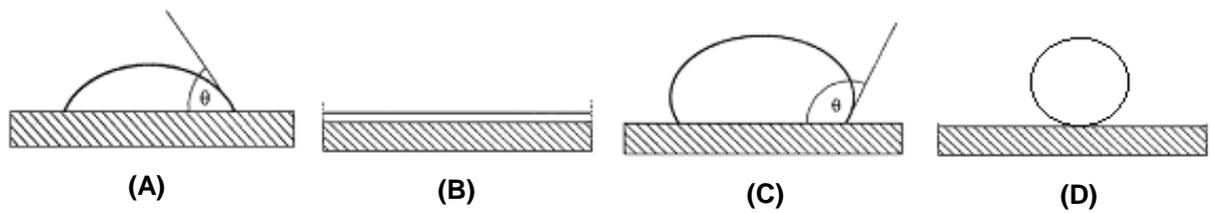
onde:  $r$  = fator de rugosidade que representa a relação entre a área da interface sólido/ líquido real e a área aparente (geométrica) desta interface.

A Figura 27 mostra uma gota sendo depositada em duas superfícies diferenciadas, uma na superfície ideal (A) e a outra em uma superfície real (B). Para uma superfície real o ângulo de contato é medido entre a tangente da interface entre o líquido-vapor e a linha que representa a superfície sólida aparente (BIOLIN SCIENTIFIC, 2016).



**Figura 27.** Medição do ângulo de contato em superfícies ideais e reais.

O comportamento que uma gotícula assume quando depositada sobre uma superfície pode variar em diversas geometrias, formando maior ou menor ângulo de contato (Figura 28). Para que uma superfície seja de molhabilidade considerável, o ângulo de contato ( $\theta$ ) fica abaixo de  $90^\circ$ , e esta superfície é chamada hidrófila. Se este ângulo for zero a superfície é chamada de superhidrófila. Quando  $\theta$  é maior que  $90^\circ$ , a superfície não molha, e é chamada de hidrófuga. Se esse ângulo, é contudo, superior à  $165$  ou  $180^\circ$ , a superfície é chamada superhidrófuga (BURKARTER, 2006).



**Figura 28.** Comportamento da gota sobre uma superfície. (A) Ângulo de contato abaixo de 90°. (B) Ângulo de contato zero (espalhamento total). (C) Ângulo de contato maior que 90°. (D) Ângulo de contato igual à 180° (RIBEIRO; PANDOLFELLI, 2008).

#### *Método do goniômetro*

O método do goniômetro refere-se à medição direta da tangente do ângulo de contato no ponto de contato trifásico (vapor, líquido e sólido) no perfil da gota séssil. Referido como “telescópio-goniômetro”, o equipamento consiste numa base horizontal para montar a amostra sólida ou líquida, uma pipeta de micrômetro para formação da gota do líquido, uma fonte de iluminação e um telescópio equipado por uma ocular (YUAN; LEE, 2013).

Esse método óptico direto apresenta vantagens devido à sua simplicidade e o fato que é necessária pequena quantidade de líquido e substratos superficiais pequenos, por outro lado há um maior risco de impacto de impurezas nas amostras. Outra desvantagem é a dependência do operador para que haja uma boa precisão do método (YUAN; LEE, 2013).

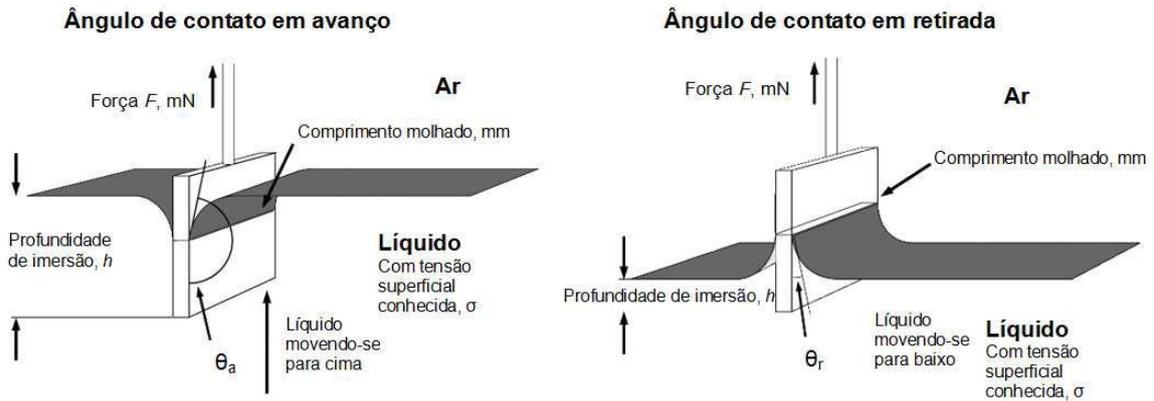
#### *Método de Wilhelmy*

O método de análises de ângulo de contato dinâmico, chamado de método da placa inclinada de Wilhelmy, o ângulo de contato não é medido diretamente, mas estimado a partir da medição da força que atua na amostra quando esta é imersa ou retirada de um líquido com tensão superficial conhecida,  $\gamma_{LV}$  à uma profundidade e velocidade controladas (WALINDER, 2000). A placa de Wilhelmy é composta por uma balança onde é presa a placa que mede a força exercida pela superfície líquida em uma amostra.

Este método consiste em suspender uma amostra sólida em uma balança de forma que esta esteja perpendicular à superfície do líquido. Quando a amostra sólida é imersa no líquido ocorre a atuação de três forças: o peso da placa, o impulso para cima sobre a parte submersa da amostra e a tensão superficial do líquido sobre a amostra (YANG; SIQUN, 2006). O aumento do peso ou força  $F$  é utilizado para o cálculo do ângulo de contato pela seguinte equação:

$$F = \cos \theta \sigma p - \rho A h g \quad (5)$$

onde:  $F$  = força medida durante a imersão e a retirada da amostra do líquido (mN);  $\theta$  = ângulo de contato entre o líquido e a amostra (°);  $\sigma$  = tensão superficial do líquido (mN.m<sup>-1</sup>);  $p$  = perímetro ou comprimento molhado da amostra (m);  $\rho$  = densidade do líquido (kg.m<sup>-3</sup>);  $A$  = área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>);  $h$  = profundidade de imersão (m); e  $g$  = constante gravitacional.  $F$  é plotado contra a profundidade de imersão  $h$  e uma linha reta é obtida onde  $-\rho A g$  é a inclinação e  $\cos \theta \sigma p$  é a interceptação. Portanto, se a tensão superficial do líquido e o perímetro da amostra são conhecidos, a equação 5 é resolvida por meio de regressão linear para determinar o  $\cos \theta$  (SON; GARDNER, 2004). A imersão e retirada de um líquido determina os ângulos de contato em avanço e recuo, respectivamente (Figura 29).



**Figura 29.** Método de Wilhelmy para determinação do ângulo de contato em avanço e em recuo (KRÜSS GmbH, 1993).

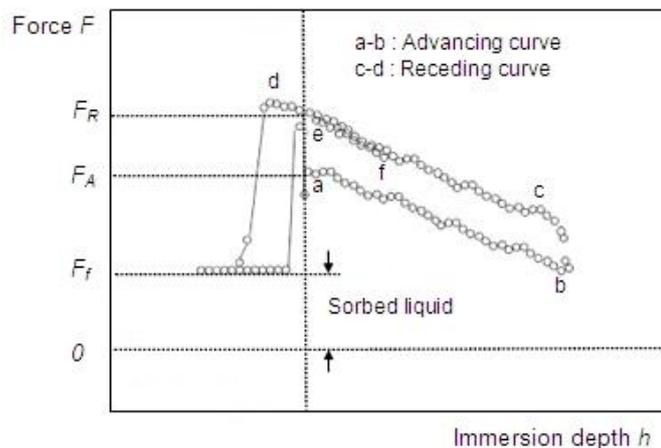
A Figura 30 mostra um gráfico da força  $F$  em função da profundidade de imersão  $h$  quando uma amostra é imersa e retirada de um líquido. Nenhuma força é registrada até o líquido toque a amostra. As etapas (a-b) e (c-d) representam as curvas de avanço e de recuo, respectivamente. As intercepções  $F_A$  e  $F_R$  são obtidas por regressão linear das curvas de avanço ( $F_A$ ) e de recuo ( $F_R$ ).  $F_f$  é a força final ou peso do líquido absorvido durante o ciclo de ensaio. As intercepções para as curvas de avanço e recuo são obtidas por:

$$F_A = \cos \theta_A \sigma p \quad (6)$$

e

$$F_R = \cos \theta_R \sigma p + F_f \quad (7)$$

onde:  $\theta_A$  = ângulo de contato em avanço; e  $\theta_R$  = ângulo de contato em recuo. A etapa (e-f) mostra quando a amostra é imersa durante o segundo momento. Neste caso, as curvas de avanço e de recuo são aproximadamente coincidentes, por conseguinte, não há nenhuma histerese, o que significa que  $\theta_A = \theta_R = 0$  (SON; GARDNER, 2004).



**Figura 30.** Método de Wilhelmy mostrando a força  $F$  em função da profundidade de imersão  $h$  durante a imersão e retirada de uma amostra sólida em um líquido.  $F_A$  e  $F_R$ : força obtida pela curva de regressão linear em avanço e em recuo, respectivamente.  $F_f$ : força final ou peso do líquido absorvido durante o teste (SON; GARDNER, 2004).

## *Método DSA*

A forma de uma gota líquida depende da combinação dos efeitos interfacial e gravitacionais. A tensão superficial tende a minimizar a área superficial da gota esférica, enquanto a gravidade deforma a gota de duas maneiras: alongando uma gota pendente e/ou achatando uma gota séssil. Este equilíbrio entre a tensão superficial e forças externas (como a gravidade) é refletida matematicamente na Equação de Laplace, que oferece a possibilidade de determinar a tensão superficial analisando a forma da gota através de imagens, esse método é uma evolução do método do goniômetro (YUAN; LEE, 2013).

O método DSA produz resultados razoáveis quando a gota do líquido é extremamente pequena, no entanto a gravidade pode afetar se a forma da gota for muito grande (YUAN; LEE, 2013).

O ângulo de contato é determinado com base na imagem da queda da gota do líquido sobre a superfície de um sólido, uma curva é formada nesse ângulo de contato estático fazendo a sua medição. O valor do ângulo de contato é calculado por um modelo matemático e esse mesmo modelo ajusta a forma da gota. Diferentes métodos de análise da forma da queda da gota podem ser utilizados, dependendo do tipo de mensuração do ângulo de contato (ângulo de contato estático ou ângulo de contato dinâmico), onde todos os métodos calculam o ângulo de contato na interseção da linha de contorno de queda com a linha de superfície sólida. Estes métodos são os seguintes: método tangente 1, método tangente 2, método largura-altura, método de ajuste do círculo e Young-Laplace (gota séssil) (KRÜSS GmbH, 2011).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Material

Neste estudo foram selecionadas oito espécies de madeiras amazônicas, sendo elas: abiurana (*Pouteria guianensis* Aubl., Família: Sapotaceae), garapeira (*Apuleia molaris* Spruce ex Benth., Família: Fabaceae), jequitibá (*Cariniana* sp., Família: Lecythidaceae), cedro (*Cedrela odorata* L., Família: Meliaceae), angelim (*Parkia pendula* (Wild.) Benth. Ex Walp., Família: Fabaceae), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum* Ducke, Família: Fabaceae), cerejeira (*Amburana acreana* (Ducke) A. C. Sm., Família: Fabaceae) e cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., Família: Fabaceae). O material foi coletado na Floresta Macaúã (floresta nativa manejada) situada no município de Sena Madureira, Acre. As toras foram processadas na empresa Nova Canaã em Sena Madureira com o uso de uma serra fita para o desdobro primário e serra circular simples para o refilo das peças e destopadeira. Amostras de 10 x 30 x 150 mm<sup>3</sup> (espessura x largura x comprimento) foram confeccionadas, aplainadas em uma das faces e lixadas na outra, e, posteriormente acondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% UR até atingir peso constante. Na secagem das amostras foram utilizadas micro-prensas para restringir os defeitos de secagem.

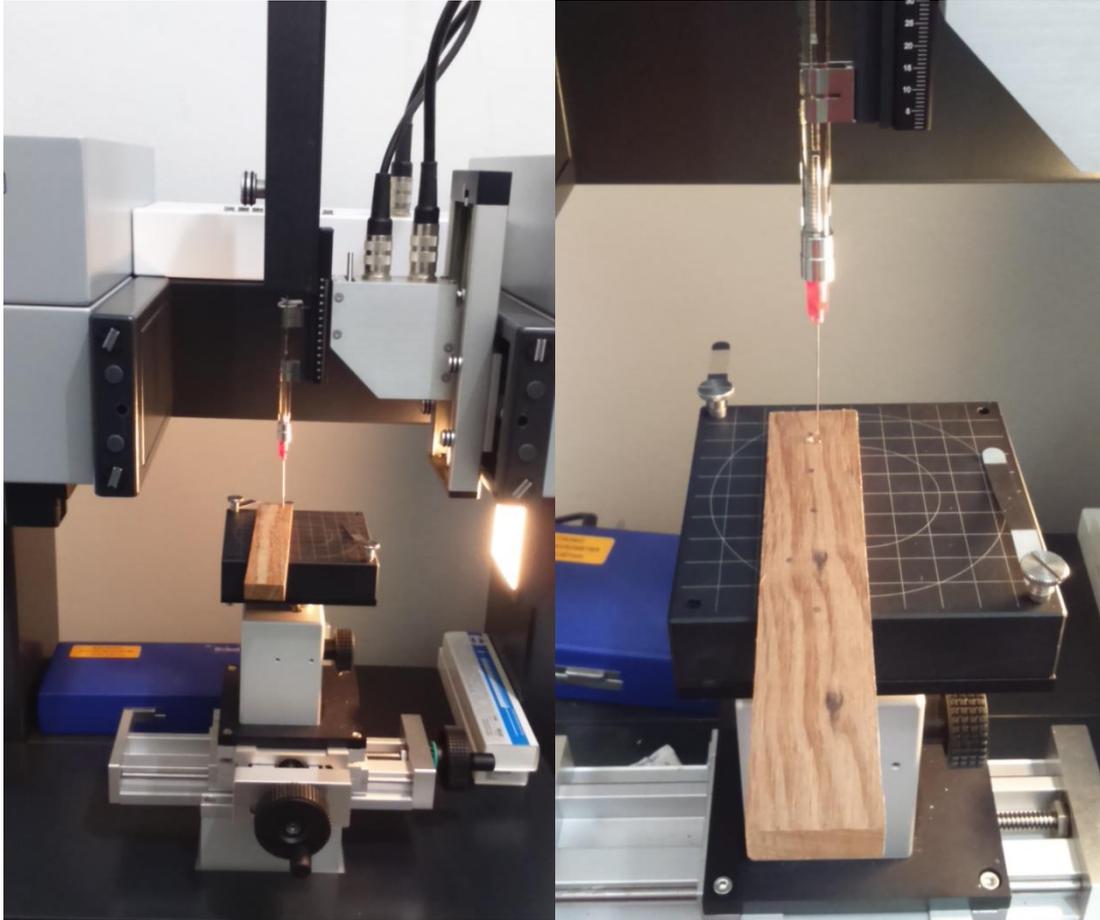
As madeiras foram classificadas de acordo com a textura (fina, média e grossa), a qual foi caracterizada macroscopicamente quanto ao tamanho relativo das células. Na classe de textura fina foram incluídas as madeiras que apresentaram uma estrutura uniforme com células geralmente pequenas enquanto que na classe de textura grossa foram incluídas as madeiras que apresentam uma estrutura composta por poros de grandes diâmetros e/ou parênquima abundante (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; CORADIN; MUÑIZ, 1992). A textura média foi considerada como uma classe intermediária.

A densidade aparente das madeiras foi determinada de acordo com a norma ASTM D 2395-93 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 1999).

### 3.2 Análises de ângulo de contato

As análises de ângulo de contato na superfície das madeiras foram realizadas pelo sistema de análise de formato da gota (*Drop Shape Analysis* DSA100) (Figura 31), versão 1.92 da KRÜSS GmbH (Hamburg, Alemanha). O sistema de análise de formato da gota DSA é composto por três componentes: (1) uma mesa de suporte para fixação da amostra; (2) um sistema de vídeo com câmera, um sistema óptico, um prisma padrão de formato para determinação do ângulo de contato, uma fonte de iluminação e abertura; e (3) um sistema dosador que pode ser controlado manualmente ou com o auxílio do software DSA1. As medições de ângulo de contato foram feitas pelo método da gota séssil (modo estático) através do software DSA1, o qual permite gravar as imagens da gota depositada na superfície da amostra e calcular o ângulo de contato ao longo do tempo de medição.

As análises foram realizadas em ambiente climatizado, sendo utilizada água destilada como líquido teste à 20°C, uma seringa dosadora de 100 µl com agulha de 0,5 mm de diâmetro e uma distância de 3 mm entre a agulha e a superfície do material. Foram realizadas cinco medições de ângulo de contato por amostra em que o tempo total de cada medição foi de 120 s com leituras a cada 10 s totalizando 60 leituras por amostra em cada uma das faces (aplainada e lixada). Para cada espécie de madeira foram utilizadas 15 repetições. Foram avaliadas três variáveis: ângulo de contato inicial (primeira leitura obtida após 10 s), ângulo de contato final (última leitura obtida após 120 s) e ângulo médio (média das 12 leituras efetuadas ao longo de 120 s).



**Figura 31.** (A) Sistema de análise de formato da gota DSA100 (KRÜSS GmbH, Hamburg, Alemanha) utilizado para as medições de ângulo de contato na superfície da madeira. (B) Mesa de suporte da amostra e seringa dosadora.

### 3.3 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial foi determinada através do rugosímetro de agulha modelo TR 200 de acordo com a norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2002). As medições de rugosidade foram realizadas em cinco pontos de cada amostra no sentido perpendicular à grã nas superfícies aplainada e lixada. Para cada ponto foram determinados os seguintes parâmetros de amplitude: rugosidade aritmética ou média ( $R_a$ ): determinada em função da linha média do perfil de rugosidade; rugosidade total ( $R_z$ ): correspondente à distância vertical entre o pico mais alto ( $R_p$ ) e o vale mais profundo ( $R_v$ ) no comprimento de medição, independente dos valores de rugosidade parcial; e rugosidade máxima ( $R_y$  ou  $R_t$ ): definida como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição (*cut-off*). O comprimento de medição foi de 5 mm com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 2,5 mm para todas as amostras e utilizou-se filtro Gauss.

### 3.4 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas através do programa STATISTICA 7.0. A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias através do teste de Levene à 95% de probabilidade. Os dados não atenderam os pressupostos da análise de variância, portanto, utilizou-se os testes não paramétricos de Wilcoxon-Mann-Whitney (comparação entre dois grupos independentes) e Kruskal-Wallis (comparação entre múltiplos grupos independentes).

A molhabilidade superficial foi avaliada através de três parâmetros (variáveis dependentes): ângulo inicial, ângulo final e ângulo médio visando comparar o preparo da superfície (aplainada e lixada) e as classes de textura (fina, média e grossa) das madeiras.

Análises de correlação foram feitas entre as variáveis de molhabilidade (ângulos de contato inicial, final e médio) e os parâmetros de rugosidade superficial ( $R_a$ : rugosidade aritmética ou média,  $R_z$ : rugosidade total,  $R_t$ : rugosidade máxima,  $R_p$ : distância vertical do pico mais alto no comprimento de medição,  $R_v$ : vale mais profundo no comprimento de medição) e a textura para as faces aplainada e lixada.

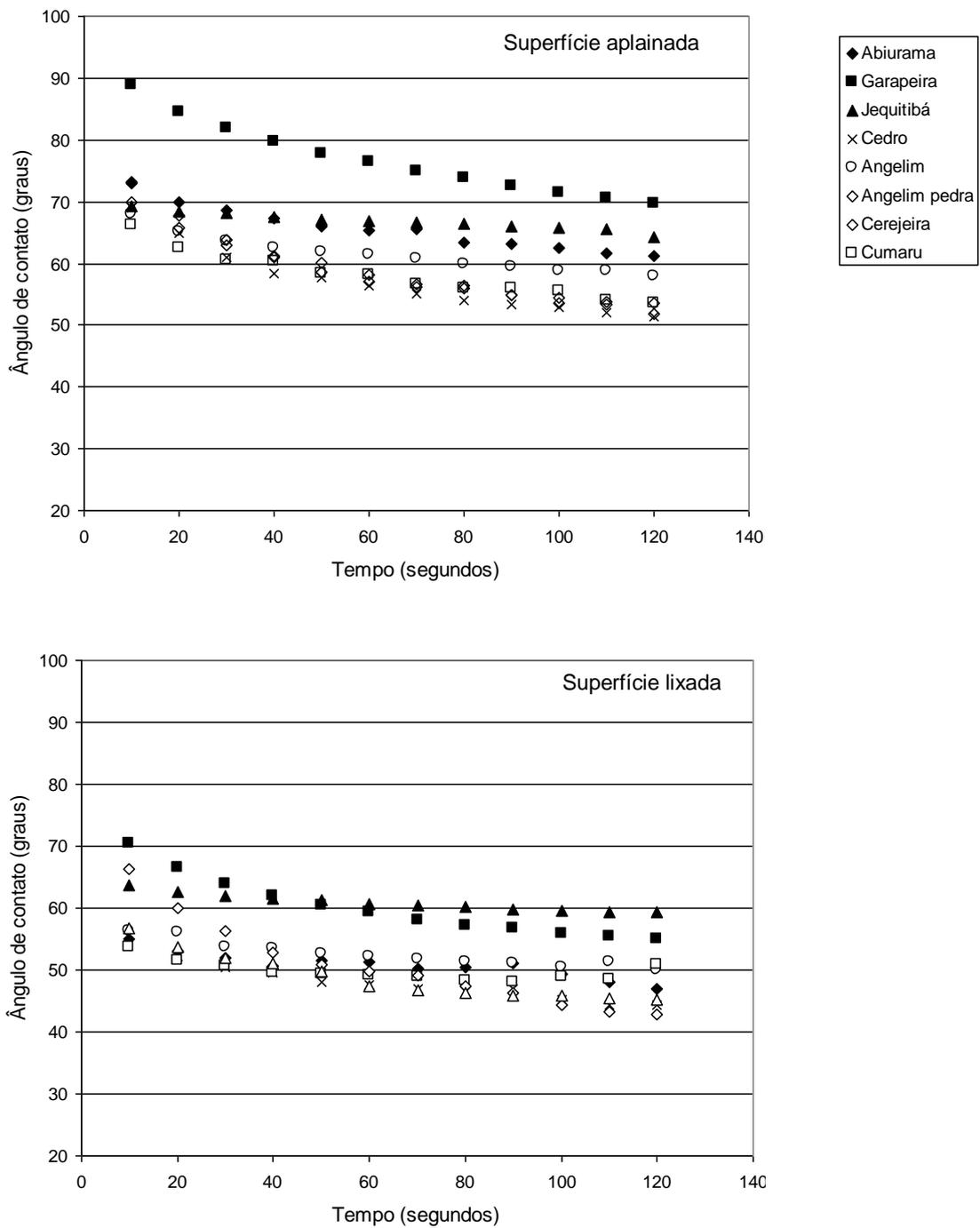
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Comportamento do ângulo de contato em função do tempo

A Figura 32 apresenta a variação do ângulo de contato das oito espécies de madeira em função do tempo para as superfícies aplainadas e lixadas. Na superfície aplainada, ocorre uma rápida diminuição do ângulo de contato na fase inicial (fase de espalhamento) até cerca de 60 s e, em seguida, o ângulo começa a se estabilizar e entrar em equilíbrio (fase de difusão) próximo a 100 s (Figura 32). Na superfície lixada, observa-se uma redução no ângulo de contato inicial e um espalhamento mais rápido (até cerca de 40 s) do líquido na superfície da madeira, geralmente atingindo o ponto de equilíbrio do ângulo de contato aos 60 s (Figura 32B). Isso indica que o lixamento favorece o espalhamento do líquido na superfície da madeira resultando em menores ângulos de contato. Isso ocorre porque as superfícies das madeiras lixadas apresentam entupimento dos lumens celulares pelo pó da lixa, fazendo com que a gota não penetre por capilaridade na estrutura porosa da madeira, espalhando-se livremente pela superfície.

Quando comparamos o comportamento do ângulo de contato entre as espécies de madeira na superfície aplainada, os ângulos de contato das madeiras de textura fina (abiurana, garapeira e jequitibá) são maiores (Figura 32) em relação às demais madeiras. Nas madeiras de abiurana e jequitibá, o ângulo de contato começa a entrar em equilíbrio próximo de 70-80 graus, o que não ocorre na madeira de garapeira, a qual apresenta maior densidade aparente e maiores valores de ângulo de contato (Figura 32). As madeiras de jequitibá e abiurana apresentam densidades muito próximas ( $0,606 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,703 \text{ g.cm}^{-3}$ , respectivamente), as quais são menores que aquela da madeira de garapeira ( $0,911 \text{ g.cm}^{-3}$ ) (Tabela 9). Desta forma, a maior densidade aparente da garapeira pode explicar os maiores valores de ângulo, indicando uma maior dificuldade para o espalhamento e penetração por capilaridade do líquido. Madeiras de alta densidade apresentam menor porosidade devido à maior espessura da parede celular e menor proporção de lumen limitando a penetração de adesivos (líquidos) (FOREST PRODUCTS SOCIETY, 2010). Na superfície lixada, o comportamento do ângulo de contato é diferente, já que o lixamento altera as condições da superfície, podendo ocasionar o entupimento dos poros.

O comportamento do ângulo de contato ao longo do tempo para as madeiras de textura média e grossa mostra que elas apresentam maior molhabilidade (ou menor ângulo). Isso ocorre devido à maior penetração do líquido por capilaridade na superfície porosa da madeira. De acordo com Kúdela (2014), em madeiras de estrutura muito porosa, o líquido penetra por capilaridade na superfície, implicando em mudanças permanentes do ângulo de contato em função do tempo.



**Figura 32.** Variação do ângulo de contato da superfície das madeiras (aplainada e lixada) amazônicas em função do tempo.

## 4.2 Efeito da rugosidade, textura e densidade na molhabilidade da superfície

A Tabela 9 apresenta as médias de densidade aparente e ângulos de contato (ângulo inicial, ângulo final e ângulo médio) das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. As madeiras apresentaram grandes variações de ângulo de contato entre si, mostrando a heterogeneidade desse material. A madeira de garapeira apresentou os maiores valores de ângulo de contato inicial para os dois tipos de preparos de superfície (aplainada e lixada) (Figura 33). Entretanto, para os ângulos final e médio, na superfície lixada, a madeira de jequitibá não se diferenciou estatisticamente da madeira de garapeira.

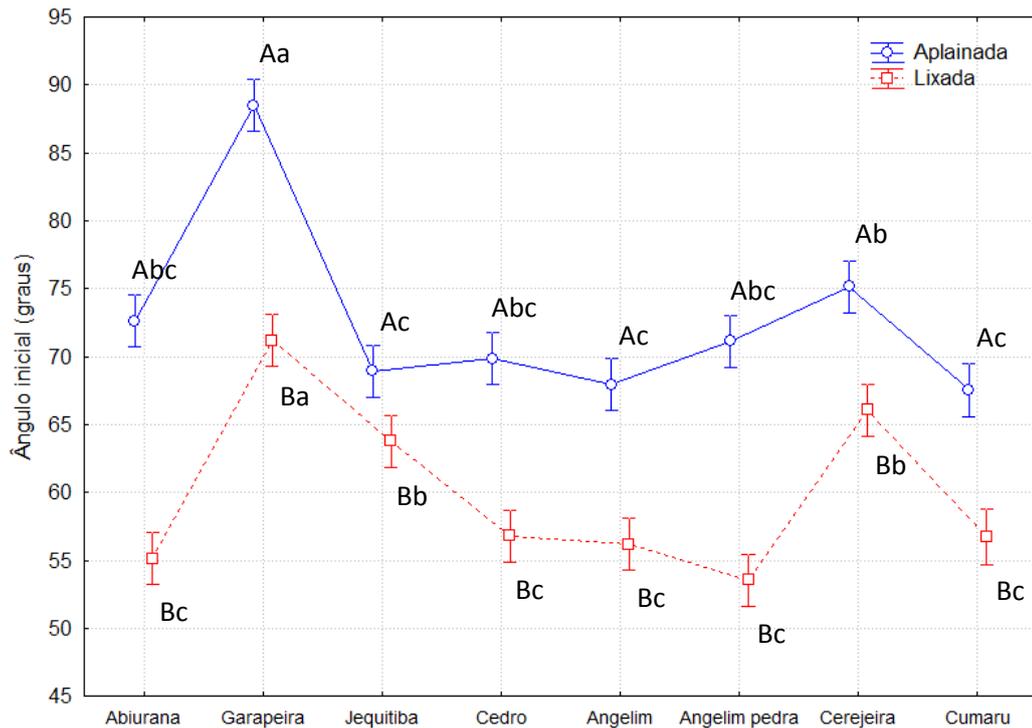
**Tabela 9.** Valores médios de densidade e ângulo de contato das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície e das classes de textura.

Textura	Espécie	Densidade aparente (g.cm <sup>-3</sup> ) U = 12%	Ângulo inicial – após 10 s (graus)		Ângulo final – após 120 s (graus)		Ângulo médio (graus)	
			Aplainada	Lixada	Aplainada	Lixada	Aplainada	Lixada
Fina	Abiurana	0,606 e [91,33]	72,63 Abc [294,75]	55,11 Bc [201,40]	61,20 Abc [328,39]	47,13Bbc [246,35]	65,56 Abc [318,44]	49,82 Bbc [234,71]
	Garapeira	0,911 b [424,03]	88,48 Aa [515,43]	71,19 Ba [495,45]	69,83 Aa [470,73]	54,99 Ba [423,61]	76,97 Aa [498,66]	60,11 Ba [458,46]
	Jequitibá	0,703 d [185,83]	69,02 Ac [231,59]	63,76 Bb [378,63]	65,30 Aab [414,89]	59,22 Ba [481,03]	66,81 Ab [360,25]	60,87 Ba [462,07]
Média	Cedro	0,575 e [67,83]	69,84 Abc [263,33]	56,06 Bc [233,92]	52,41 Ae [187,23]	44,60 Bcd [191,66]	58,50 Ad [200,09]	48,29 Bc [196,94]
Grossa	Angelim	0,974 a [521,82]	67,81 Ac [221,70]	56,24 Bc [221,94]	58,11 Acd [293,43]	49,87 Bb [306,44]	61,47 Acd [264,55]	52,34 Bb [284,66]
	Angelim pedra	0,839 bc [334,17]	71,15 Abc [270,22]	53,54 Bc [161,01]	53,29 Ade [210,99]	47,79 Bbc [262,47]	60,01 Ad [228,95]	49,57 Bbc [218,44]
	Cerejeira	0,766 cd [260,83]	74,84 Ab [340,89]	66,07 Bb [391,82]	53,02 Ade [213,39]	42,65 Bd [166,17]	60,35 Acd [250,59]	50,45 Bbc [253,71]
	Cumarú	0,968 a [510,20]	67,22 Ac [213,02]	56,73 Bc [244,91]	54,82 Ade [235,54]	47,65Bbc [246,57]	59,73 Acd [232,02]	49,08 Bbc [212,39]

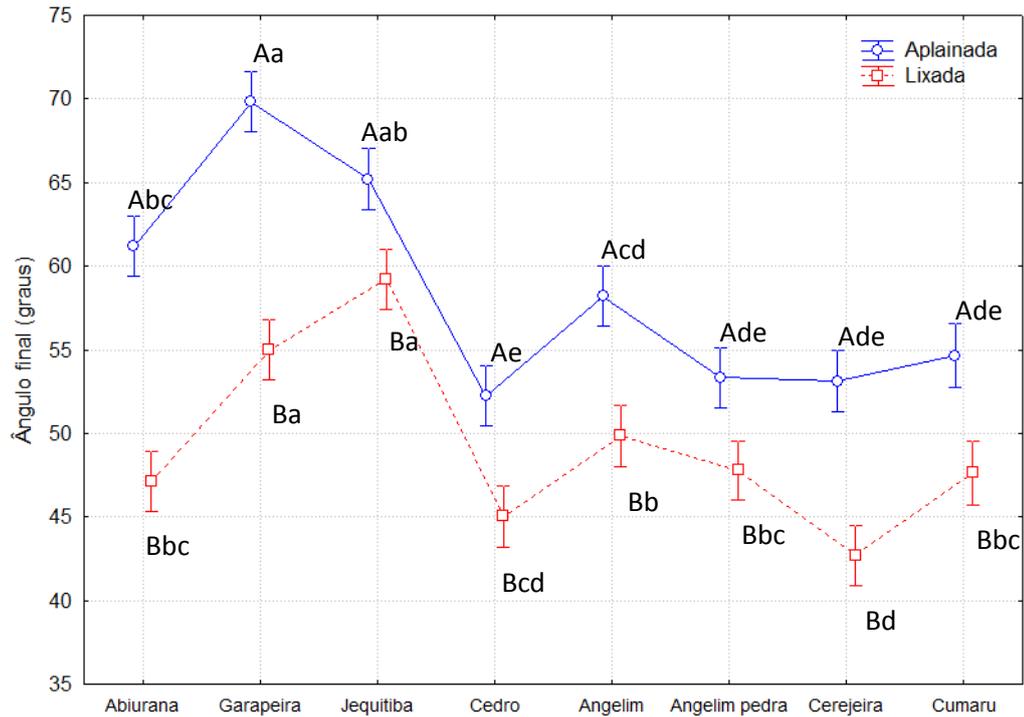
Valores entre colchetes = média dos postos obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0.05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (dentro da espécie). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.

Quanto ao preparo de superfície (aplainada vs lixada), todas as espécies de madeira apresentaram menores valores de ângulo na superfície lixada, indicando uma maior molhabilidade (Figuras 33, 34 e 35). Resultados similares foram encontrados por Santoni e Pizzo (2011), em que foram estudadas seis espécies de madeira da região do Mediterrâneo onde as superfícies lixadas apresentaram maior molhabilidade do que as superfícies serradas.

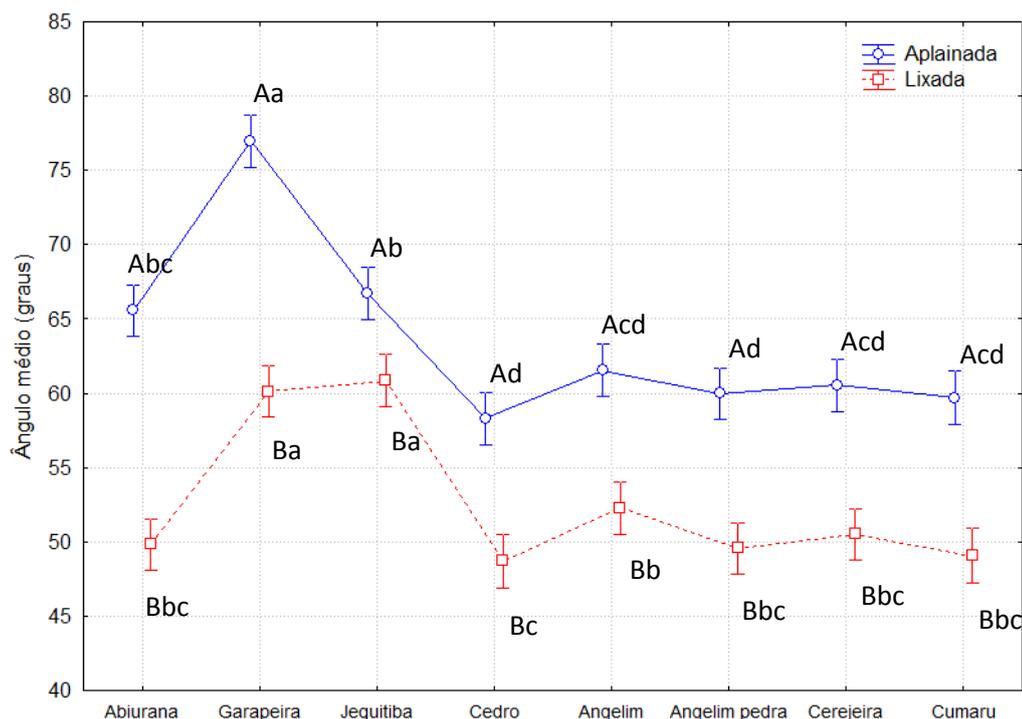
De acordo com Arnold (2010), as superfícies lixadas apresentam maior molhabilidade devido ao rápido espalhamento da gota, enquanto que nas superfícies aplainadas a gota permanece razoavelmente estável durante algum tempo. O lixamento da superfície da madeira pode causar o esmagamento e o entupimento das células, diminuindo a penetração de líquidos (MEIJER; THURICH; MILITZ, 1998), mas por outro lado, também pode acelerar o espalhamento do líquido na superfície devido as fibrilações e ranhuras celulares superficiais (DE MOURA; HERNANDEZ, 2006).



**Figura 33.** Ângulo de contato inicial das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.



**Figura 34.** Ângulo de contato final das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.



**Figura 35.** Ângulo de contato médio das madeiras amazônicas em função do preparo da superfície. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições de preparo da superfície (aplainada x lixada). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição de preparo da superfície.

A Tabela 10 apresenta a correlação entre os ângulos de contato (ângulo inicial, ângulo final e ângulo médio) e os parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  e  $R_v$ ) da superfície das madeiras amazônicas. Os valores médios para os parâmetros de rugosidade superficial foram:  $R_a = 9,9 \mu\text{m}$  (aplainada) e  $4,0 \mu\text{m}$  (lixada),  $R_z = 64,2 \mu\text{m}$  (aplainada) e  $36,0 \mu\text{m}$  (lixada),  $R_t = 73,7 \mu\text{m}$  (aplainada) e  $45,4 \mu\text{m}$  (lixada),  $R_p = 26,9 \mu\text{m}$  (aplainada) e  $11,3 \mu\text{m}$  (lixada) e  $R_v = 37,3 \mu\text{m}$  (aplainada) e  $24,7 \mu\text{m}$  (lixada), como apresentado na Tabela 6. Na superfície aplainada somente o ângulo inicial apresentou correlação positiva e significativa com o parâmetro  $R_a$ , sendo esta muito baixa ( $r = 0,10$ ). Já na superfície lixada, os ângulos de contato (ângulo inicial, ângulo final e ângulo médio) apresentaram correlação negativa e significativa com os parâmetros de rugosidade superficial, indicando que superfícies mais molháveis (com menor ângulo) apresentam maiores valores de rugosidade. Isso ocorre porque a rugosidade da superfície afeta a molhabilidade devido às forças de capilaridade (DENES; CRUZ-BARBA; MANOLACHE, 2005), ou seja, madeiras de textura grossa (com maior rugosidade) apresentam poros de grandes diâmetros que aumentam a absorção do líquido depositado na superfície devido às maiores forças de capilaridade.

Na superfície lixada, as análises de correlação foram mais importantes entre a textura e os parâmetros de rugosidade (Tabela 10) com coeficientes de correlação de 0,49 e 0,48 para os parâmetros  $R_a$  e  $R_p$ , respectivamente. Isso mostra que as madeiras de textura grossa apresentam maior rugosidade superficial e vice-versa.

**Tabela 10.** Correlação entre os ângulos de contato e a textura e os parâmetros de rugosidade das madeiras amazônicas.

Superfície aplainada					
Variável	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>v</sub>
Ângulo inicial	0,10*	-0,00	-0,04	0,07	-0,04
Ângulo final	-0,01	-0,00	0,05	0,02	-0,02
Ângulo médio	0,03	-0,01	0,01	0,04	-0,04
Textura	0,16*	0,04	-0,07	0,19*	-0,06
Superfície lixada					
Ângulo inicial	-0,10*	-0,10*	-0,12*	-0,11*	-0,10*
Ângulo final	-0,30*	-0,22*	-0,21*	-0,24*	-0,19*
Ângulo médio	-0,26*	-0,21*	-0,20*	-0,22*	-0,19*
Textura	0,49*	0,41*	0,42*	0,48*	0,36*

\*Significativo  $P > 0.05$ . R<sub>a</sub> = rugosidade média, R<sub>z</sub> = rugosidade total, R<sub>t</sub> = rugosidade máxima, R<sub>p</sub> = distância vertical do pico mais alto no comprimento de medição e R<sub>v</sub> = vale mais profundo no comprimento de medição.

A Tabela 11 apresenta as médias dos postos de Kruskal-Wallis dos ângulos de contato (ângulo inicial, ângulo final e ângulo médio) em função das classes de textura das madeiras para as faces aplainada e lixada. A textura da madeira afetou todos os ângulos de contato (inicial, final e médio) nos dois tipos de preparo da superfície. Na superfície aplainada, o ângulo de contato das madeiras de textura fina diferenciou estatisticamente daqueles das madeiras de texturas média e grossa (Tabela 10) em que as madeiras de textura fina apresentaram menor molhabilidade (ou maiores valores de ângulo). O mesmo comportamento foi observado para a superfície lixada. Segundo Luz, Ribeiro e Pandolfelli (2008), a heterogeneidade da superfície do substrato é afetada pela heterogeneidade topográfica causada pela rugosidade ou porosidade superficial, onde a porosidade também contribui para o espalhamento do líquido provocando alterações locais nas energias superficiais. A porosidade superficial no substrato madeira é expressa pelos lumens celulares onde o molhamento é proporcionado pela capilaridade celular e dependente da proporção de lumens.

A superfície lixada apresentou menores valores de ângulo inicial, final e médio que a superfície aplainada, independente da espécie (Figuras 33-35). De Moura e Hernandez (2005) relatam que as superfícies lixadas apresentaram boas condições para o espalhamento da água devido as ranhuras provocadas na superfície da madeira pelos abrasivos da lixa, acelerando a condução da água por capilaridade. As ranhuras provocadas pelo lixamento aumentam a área superficial específica provocando menores ângulos de contatos consequentemente superfície com maior molhabilidade.

A textura afetou o ângulo inicial nas duas condições de preparo da superfície (aplainada e lixada) (Tabela 11). Na superfície aplainada, a madeira de garapeira destaca-se por apresentar o maior valor, o que pode ser explicado pela sua textura fina combinada à sua alta densidade aparente (Figura 12). Na superfície lixada, também é possível observar que o efeito da densidade da madeira no ângulo inicial. Na classe de textura fina, o maior valor de ângulo inicial foi obtido para a madeira mais densa (garapeira). Já na classe de textura grossa ocorreu o inverso, as madeiras com maiores densidades (angelim, angelim pedra e cumaru) apresentaram os menores valores de ângulo inicial (Figura 33). Amorim et al. (2013) encontrou uma relação estatisticamente significativa entre o ângulo de contato e a densidade,

mostrando que até cerca de  $0,85 \text{ g.cm}^{-3}$  ângulo de contato continua a aumentar, indicando uma molhabilidade menor em madeiras mais densas. A molhabilidade da superfície é um fenômeno complexo e envolve fatores físicos (ex.: estrutura celular e rugosidade superficial) e químicos (ex.: natureza e teor dos extrativos).

A textura também afetou o ângulo final nas duas condições de preparo de superfície. Na superfície aplainada, a madeira de cedro apresentou o menor valor absoluto de ângulo final, não se diferenciando das madeiras de angelim pedra, cerejeira e cumaru (Figura 34). Já na superfície lixada, as três classes de textura se diferenciaram significativamente (Tabela 11). A superfície lixada da madeira de cerejeira apresentou o menor valor absoluto de ângulo final, não se diferenciando da madeira de cedro (Figura 34).

Na Figura 35 observa-se que nas amostras com a superfície aplainada as madeiras de textura fina apresentaram valores absolutos maiores para ângulo médio do que as madeiras de textura média e grossa. Já na superfície lixada o comportamento não ocorre de mesma forma, onde as madeiras de garapeira e jequitibá apresentam os maiores valores absolutos, porém a madeira de abiurana não se diferencia estaticamente das madeiras de textura média e grossa.

Esses resultados mostram que a rugosidade superficial, a textura e a densidade da madeira tem um impacto importante na molhabilidade da superfície. Entretanto, quando avaliamos a molhabilidade de diferentes espécies de madeira dentro de uma mesma classe de textura, a densidade não é suficiente para explicar o comportamento de molhabilidade. A composição química peculiar de cada espécie de madeira poderia explicar o comportamento do ângulo ao longo do tempo.

**Tabela 11.** Média dos postos de Kruskal-Wallis do ângulo de contato em função das classes de textura das madeiras amazônicas para as superfícies aplainada e lixada.

Superfície aplainada			
Textura	Ângulo inicial	Ângulo final	Ângulo médio
Fina	347,77 a	404,63 a	392,59 a
Média	263,33 b	187,23 b	200,09 b
Grossa	262,43 b	238,20 b	244,16 b
Valor H	34,76*	155,35*	122,88*
Superfície lixada			
Fina	359,81 a	384,45 a	386,08 a
Média	233,92 b	191,66 c	196,94 b
Grossa	254,43 b	245,71 b	243,11 b
Valor H	59,09*	114,61*	116,88*

Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si. \*  $P > 0,05$ .

## **5 CONCLUSÕES**

As superfícies lixadas apresentaram maior molhabilidade (menor valores de ângulo de contato) em relação às superfícies aplainadas independente da espécie.

A textura da madeira apresentou correlação significativa com os ângulos de contato em que as madeiras de textura fina apresentaram menor molhabilidade.

Os parâmetros de rugosidade superficial têm uma influência sobre a molhabilidade das madeiras, porém esses parâmetros devem ser associados a outras características como o preparo da superfície da madeira e textura da madeira.

### **CAPÍTULO III**

**EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE DE  
MADEIRAS AMAZÔNICAS: UMA ABORDAGEM QUÍMICA**

**EFFECT OF AGING ON WETTING OF THE AMAZONIAN WOOD SURFACE:  
A CHEMICAL APPROACH**

## RESUMO

A superfície da madeira pode se tornar inativa devido às modificações físico-químicas ocasionadas principalmente pela presença dos extrativos, reduzindo a capacidade de molhabilidade e penetração de líquidos na madeira. Entretanto, esse fenômeno depende do teor e da natureza dos extrativos, os quais variam consideravelmente entre as espécies. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do envelhecimento natural na inativação da superfície de madeiras amazônicas através de análises de ângulo de contato e da espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier (FT-IR). As madeiras estudadas foram: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) e cumaru (*Dipteryx odorata*). A molhabilidade superficial foi determinada através de análises de ângulo de contato com o equipamento Drop Shape Analyser DSA 100 com medições a cada 10 s durante 120 s. As medições de ângulo de contato foram efetuadas na superfície fresca (recém lixada) e na superfície envelhecida após 7, 14 e 21 dias. As amostras de madeira foram acondicionadas em câmara climática a 20°C e UR 65% durante todo o período do experimento. Os espectros FT-IR foram obtidos pelo espectrômetro VARIAN 640-IR FT-IR em modo de transmitância. O ângulo de contato das madeiras de abiurana, garapeira e cerejeira diminuiu após o envelhecimento, mostrando que a inativação da superfície não é afetada somente pelo teor de extrativos, mas também pelos grupos funcionais dos extrativos. A análise FT-IR dos extratos das madeiras mostrou a presença de alcoóis, éteres, ésteres, ácidos carboxílicos, alcanos, alcenos, aminas e amidas, aldeídos, cetonas, anel aromático, compostos alifáticos fluorados e nitrogenados. As análises FT-IR dos extratos das madeiras mostraram que as espécies de angelim e cumaru apresentaram menos compostos com caráter hidrofóbico, ocasionando uma menor inativação química da superfície.

**Palavras chaves:** ângulo de contato, espectroscopia no infravermelho, inativação da superfície.

## ABSTRACT

The wood surface may become inactive due to the physico-chemical modifications caused mainly by the presence of extractives, reducing the wettability and penetration of liquids in the wood. However, this phenomenon depends on the nature and content of extractives, which vary considerably among species. In this context, this study aimed to evaluate the effect of aging on the inactivation of Amazonian wood surfaces through contact angle analysis and Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. The woods studied were: abiurana (*Pouteria guianensis*), garapeira (*Apuleia molaris*), jequitibá (*Cariniana* sp.), cedro (*Cedrela odorata*), angelim (*Parkia pendula*), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum*), cerejeira (*Amburana acreana*) and cumaru (*Dipteryx odorata*). Surface wettability was determined by contact angle analysis with the Drop Shape Analyzer DSA 100 with measurements every 10 s during 120 s. Contact angle measurements were performed on the fresh (freshly sanded) surface and aged surface after 7, 14 and 21 days. Wood samples were conditioned in a climate room at 20°C and 65% RH during the whole period of the experiment. The FT-IR spectra were obtained by the VARIAN 640-IR FT-IR spectrometer in transmittance mode. The contact angle of the abiurana, garapeira and cerejeira woods decreased after aging, showing that the inactivation of the surface is affected by the extractive content, but also by the functional groups of the extractives. FT-IR analysis of wood extracts showed the presence of alcohols, ethers, esters, carboxylic acids, alkanes, alkenes, amines and amides, aldehydes, ketones, aromatic ring, fluorinated aliphatic and nitrogen compounds. FT-IR analysis of the wood extracts showed that the angelim and cumaru species had less hydrophobic compounds inducing a lower chemical inactivation of the wood surface.

**Keywords:** contact angle, infrared spectroscopy, surface inactivation.

## 1 INTRODUÇÃO

A inativação da superfície da madeira, em relação à sua adesividade, está relatada às modificações físico-químicas da superfície que resultam na redução da capacidade do adesivo de molhar, fluir, penetrar e curar adequadamente (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). A superfície da madeira recentemente produzida contém todas as forças de atração molecular que anteriormente continham o material (MARRA 1992). No vácuo, a maioria das forças permanece ativa por um longo período, mas algumas se dissipam ou se tornam internamente direcionadas ao longo do tempo. Na atmosfera, uma superfície experimenta mudanças como adsorção de gás, oxidação e contaminação com partículas finas (SERNEK, 2002).

A inativação da superfície da madeira pode ser causada pelos processos de secagem, usinagem e envelhecimento da madeira. Vários mecanismos podem reduzir as forças atrativas na superfície da madeira: migração dos extrativos hidrofóbicos para a superfície durante a secagem, resultando em uma baixa molhabilidade; acidez dos extrativos (os quais afetam a adesão); oxidação da superfície causada pelo envelhecimento; reorientação molecular dos grupos funcionais da superfície; e fechamento dos microporos da parede celular, o qual reduz a absorção na madeira (CHRISTIANSEN, 1991; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). A inativação da superfície pode ser agravada com um longo tempo de exposição às temperaturas elevadas, baixa umidade relativa e baixo teor de umidade da madeira (CHRISTIANSEN, 1990). Alguns fenômenos relacionados com a inativação tal como o envelhecimento da madeira, também podem ocorrer a temperaturas mais baixa durante um período de tempo de secagem mais longo. Estes fenômenos acarretam na redução da higroscopicidade, molhabilidade e absorção (SERNEK, 2002). De acordo com Sernek (2002) métodos da inativação da superfície da madeira pode ser avaliada e/ou detectada através de ensaios mecânicos de adesão, molhabilidade ou absorvência, comparação entre o tempo de absorção de uma gota de água, medição de intensidade ou análise química por espectroscopia e alterações na cor da superfície.

Piao et al. (2010) relatam que a tensão superficial e a molhabilidade deteriora-se ao longo do tempo, este fenômeno pode ser explicado pelos extrativos presentes na madeira, sujeira, poeira, graxa, oxidação, adsorção, hidratação e umidade; porém os extrativos parece ser comumente o mais aceito pela literatura como a principal causa de deterioração da superfície da madeira com o tempo. Herczeg (1965) *apud* Piao et al. (2010) analisou o ângulo de contato da superfície aplainada de Douglas-fir e observou uma perda progressiva de molhabilidade até 45 h. Frihart e Hunt (2010) avaliando uma superfície inativa de lâmina de madeira de *Betula alleghaniensis*, constataram que após o lixamento superficial, o ângulo de contato diminuiu e a molhabilidade foi melhorada com a renovação das células da superfície. De acordo com Piao et al. (2010), a quantidade de hidroxilas na superfície da madeira diminui com o aumento do tempo de exposição, principalmente devido à adsorção de moléculas polares. Em superfícies de paredes celulares frescas e lumen aberto, proporcionada por uma usinagem superficial, dois tipos de moléculas polares podem ser adsorvidos às hidroxilas livres, i.e água e COVs (compostos orgânicos voláteis).

Uma avaliação simples da inativação da superfície da madeira pode ser realizada colocando uma gota de água na superfície e observando o quão rápido essa gota se espalha sobre a madeira. Uma superfície com boa molhabilidade e penetrabilidade absorve a gota após 20 seg; se a gota se espalha, mas a água continua na superfície após 40 seg, essa superfície apresenta boa molhabilidade e pouca penetração; e se após 40 seg a gota de água retém sua forma original com pouco espalhamento, essa superfície apresenta problemas de

inativação da superfície, ou seja, baixa molhabilidade e penetrabilidade (FRIHART; HUNT, 2010).

Os métodos espectroscópicos fornecem informações importantes para avaliação da superfície química da madeira, identificando componentes através do número de onda. Alguns desses componentes podem apresentar características relacionados à inativação da superfície da madeira. A espectroscopia no infravermelho é comumente dividida em três regiões: infravermelho próximo (near infrared – NIR), infravermelho médio/intermediário (medium infrared – MIR) e infravermelho distante ou longínquo (far infrared – FIR) (HSU, 1997). A radiação infravermelha provoca movimentos vibracionais de átomos ou grupos funcionais de átomos de compostos orgânicos, estas vibrações dão origem a absorção em regiões características. Os grupos funcionais específicos irão absorver em regiões características da região do infravermelho, sendo possível assim identificar suas atribuições (SOLOMONS; FRYHLE, 2001; LOPES; FASCIO, 2004). Como a análise dos espectros no infravermelho baseia-se na constituição anatômica e química da madeira, também é possível sua utilização para discriminar e construir uma base de dados para identificação de espécies de madeiras (MUÑIZ et al., 2013; NISGOSKI et al., 2015). A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) é uma técnica muito confiável para identificação de qualquer amostra, tornando possível o desenvolvimento de técnicas de amostragem antes impossível por tecnologia mais antiga (NICOLET, 2001).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do envelhecimento natural na inativação da superfície de madeiras amazônicas através de análises de ângulo de contato e analisar os grupos funcionais dos extrativos das madeiras através da espectroscopia FT-IR.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Inativação da superfície da madeira

A molhabilidade da superfície da madeira deteriora-se ao longo do tempo, estando este fenômeno muitas vezes referido a contaminação superficial, inativação ou ao envelhecimento. Vários fatores são atribuídos para explicar esse fenômeno, como poeira, graxas, oxidação, umidade e extrativos. Porém, os extrativos são considerados os principais causadores da inativação química da superfície da madeira (PIAO et al., 2010).

A madeira é composta principalmente por polímeros (celulose, hemiceluloses e lignina) que compõem a parede celular e são responsáveis pela maior parte das propriedades físicas e químicas da madeira; e também pelos extrativos que são compostos não pertencentes à parede celular. A presença dos polímeros na parede celular contendo grupos hidroxilas e outros grupos com oxigênio atraem a umidade por ligações de hidrogênio, tornando a madeira propícia ao molhamento (ROWELL, 1988).

Os extrativos são substâncias de baixa ou média massa molecular que compõem uma extraordinária diversidade de compostos, sendo responsáveis por características como: cor, cheiro, gosto, resistência natural e propriedades abrasivas. Podem ser extraídos em água ou solventes orgânicos (SILVÉRIO et al., 2006; KLOCK, 2013). De acordo com a composição química, os extrativos são classificados em três grupos: terpenos e terpenóides, compostos alifáticos (graxas e ceras) e compostos fenólicos (KLOCK, 2013). Os extrativos podem ser divididos em constituintes hidrofóbicos (lipofílicos) e constituintes hidrofílicos. Os hidrofóbicos consistem em resinas (madeiras de coníferas), ácidos graxos, esteroides e ésteres (madeiras de coníferas e folhosas), enquanto que os hidrofílicos consistem em alguns compostos fenólicos polares e compostos orgânicos voláteis (COV) (PIAO et al., 2010).

A porcentagem de extrativos nas madeiras é pequena, porém, a presença de extrativos pode em muitos casos dificultar os processos de colagem e aplicação de revestimentos superficiais, pois estas substâncias impedem a aderência dos adesivos ou agem como inibidoras do processo químico de cura da cola, constituindo uma linha de cola fraca (BURGER; RICHTER, 1991).

O teor e a composição dos extrativos variam de acordo com a espécie, idade e origem. Eles influenciam o comportamento da madeira à permeabilidade, que por sua vez está diretamente ligada à molhabilidade. Liu e Rials (1998) constataram que a extração da madeira realizada com acetona, água, diclorometano, etanol e benzeno, removendo parcialmente alguns extrativos, resultaram em um aumento da energia superficial da madeira melhorando a molhabilidade.

Os extrativos solúveis em solventes orgânicos incluem ácidos resinosos e graxos, incluindo também os ésteres, ceras, substâncias insaponificáveis, materiais coloridos (SARTO; SANSIGOLO, 2010). Os extrativos nas madeiras de folhosas são constituídos geralmente por gorduras, ceras e esteróides, localizados nas células de parênquima do raio, as variações quantitativas ocorrem entre diferentes espécies madeireiras (KLOCK, 2013).

Geralmente, os compostos apolares ou fracamente polares são solúveis em solventes apolares ou de baixa polaridade, enquanto que compostos de alta polaridade são solúveis em solventes também polares (MARTINS et al., 2013). O éter etílico, o diclorometano e o benzeno são solventes orgânicos mais utilizados para se estimar extrativos presentes na madeira (SARTO; SANSIGOLO, 2010).

A presença de extrativos nas superfícies da madeira contribui para a inativação da superfície através de meios físicos e químicos. Durante o processamento da madeira, os

extrativos migram na superfície e bloqueiam fisicamente o contato do adesivo com a madeira. Além disso, alguns extrativos são hidrofóbicos e repelem a água. A acidez dos extrativos também interfere com a cura de alguns adesivos (FRIHART; HUNT, 2010).

## 2.2 Espectroscopia no infravermelho

A espectroscopia na região do infravermelho (IV) é uma técnica importante para análise orgânica qualitativa e determinações quantitativas de traços de elementos (LOPES; FASCIO, 2004). O infravermelho é um método espectroscópico de análise que fornece informações quanto aos grupos funcionais que podem estar presentes na estrutura das substâncias (RIBEIRO; SOUZA, 2007). Essa técnica apresenta uma grande vantagem de analisar amostras em praticamente qualquer estado (líquidos, soluções, pastas, pós, filmes, fibras, gases e superfícies) (STUART, 2004), outras vantagens são a redução do tempo de análise, diminuição substancial nas quantidades das amostras, ampliação da capacidade de identificar ou caracterizar estruturas complexas e não destruição das amostras (LOPES; FASCIO, 2004).

A espectroscopia infravermelha é uma técnica baseada nas vibrações dos átomos de uma molécula. Um espectro infravermelho é comumente obtido pela passagem da radiação infravermelha através da amostra e determina qual fração da radiação incidente é absorvida a uma determinada energia (STUART, 2004). A radiação infravermelha abrange uma seção do espectro eletromagnético entre 13000 a  $10\text{ cm}^{-1}$  ou comprimento de onda de 0,78 a 1000  $\mu\text{m}$  (HSU, 1997), sendo a faixa de maior interesse se encontra na região de 4000 a  $400\text{ cm}^{-1}$ . O espectro infravermelho está subdividido em três regiões, sendo: infravermelho próximo – NIR, *Near Infrared* (780-2500 nm), infravermelho intermédio/médio – MIR, *Mid Infrared* (2500-5000 nm) e o infravermelho longínquo (50000 nm-1mm) (LIMA; BAKKER, 2011).

Embora o espectro de infravermelho seja característico da molécula como um todo, certos grupos de átomos dão origem a bandas que ocorrem mais ou menos na mesma frequência, independente da estrutura da molécula. A presença destas bandas características de grupos funcionais que permite obtenção de informações estruturais, através de exames do espectro e verificação as tabelas na bibliografia (SILVERSTEIN; MORRILL, 2000).

Os avanços na espectroscopia de infravermelho resultaram na introdução de espectrômetros de transformada de Fourier (FTIR). Este tipo de instrumento emprega um interferômetro e explora o modelo matemático de transformação de Fourier (STUART, 2004).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Material

Para este estudo, foram selecionadas oito espécies de madeiras amazônicas, sendo elas: abiurana (*Pouteria guianensis* Aubl., família: Sapotaceae), garapeira (*Apuleia molaris* Spruce ex Benth., família: Fabaceae), jequitibá (*Cariniana* sp., família: Lecythidaceae), cedro (*Cedrela odorata* L., família: Meliaceae), angelim (*Parkia pendula* (Wild.) Benth. Ex Walp., família: Fabaceae), angelim pedra (*Hymenolobium excelsum* Ducke, família: Fabaceae), cerejeira (*Amburana acreana* (Ducke) A. C. Sm., família: Fabaceae) e cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., família: Fabaceae). O material foi coletado na Floresta Macaúã (floresta nativa manejada) situada no município de Sena Madureira, Acre. As toras foram processadas na empresa Nova Canaã em Sena Madureira com o uso de uma serra fita para o desdobro primário e serra circular simples para o refilo das peças e destopadeira. Amostras de 10 x 30 x 150 mm<sup>3</sup> (espessura x largura x comprimento) foram confeccionadas, e, posteriormente acondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% UR até atingir peso constante.

### 3.2 Análises de ângulo de contato

As análises de ângulo de contato na superfície das madeiras foram realizadas pelo sistema de análise de formato da gota (Drop Shape Analysis DSA100) (Figura 1), versão 1.92 da KRÜSS GmbH (Hamburg, Alemanha). O sistema de análise de formato da gota DSA é composto por três componentes: (1) uma mesa de suporte para fixação da amostra; (2) um sistema de vídeo com câmera, um sistema óptico, um prisma padrão de formato para determinação do ângulo de contato, uma fonte de iluminação e abertura; e (3) um sistema dosador que pode ser controlado manualmente ou com o auxílio do software DSA1. As medições de ângulo de contato foram feitas através do software DSA1, o qual permite gravar as imagens da gota depositada na superfície da amostra e calcular o ângulo de contato ao longo do tempo de medição.

As análises foram realizadas em ambiente climatizado, sendo utilizada água destilada como líquido teste à 20°C, uma seringa dosadora de 100 µl com agulha de 0,5 mm de diâmetro e uma distância de 3 mm entre a agulha e a superfície do material. Foram efetuadas leituras de ângulo de contato a cada 10 s durante 120 s, totalizando 12 leituras para cada gota depositada na superfície. Esse procedimento foi feito em 5 pontos distintos e pré-definidos da amostra, resultando em 60 observações de ângulo de contato por amostra. Foram utilizadas 10 amostras para cada espécie. As medições de ângulo de contato foram efetuadas na superfície fresca (recém usinada) e na superfície envelhecida naturalmente após 7, 14 e 21 dias. Durante o experimento as amostras de madeira foram acondicionadas em câmara climática com condições controladas de temperatura e umidade (20°C à 65% UR). Foram avaliadas três variáveis: ângulo de contato inicial (primeira leitura obtida após 10 s), ângulo de contato final (última leitura obtida após 120 s) e ângulo médio (média das 12 leituras efetuadas ao longo de 120 s).

### 3.3 Análises químicas

O teor de extrativos das madeiras foi determinado de acordo com Abreu (1994) após a extração com três solventes orgânicos: ciclohexano, acetato de etila e metanol, utilizando um

Soxhlet durante 24 h ininterruptas para cada solvente. Após a extração, os extrativos foram depositados em recipientes de vidro e postos em uma capela para evaporação dos solventes para posterior cálculo da porcentagem de extrativos para cada solvente.

Os materiais obtidos após a extração com ciclohexano e acetato de etila foram analisados por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) em modo de transmitância difusa. Os espectros foram obtidos diretamente das soluções, as quais foram depositadas em uma placa de vidro e colocadas no suporte de amostra do equipamento. Os espectros foram registrados pelo espectrômetro VARIAN 640-IR FT-IR em modo de transmitância com  $4\text{ cm}^{-1}$  de resolução, 32 varreduras e amplitude espectral entre  $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ .

### **3.4 Análises estatísticas**

As análises estatísticas foram realizadas através do programa STATISTICA 7.0. A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias através do teste de Levene à 95% de probabilidade. Realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para as variáveis que apresentaram normalidade e homogeneidade e para as variáveis que não atenderam estes pressupostos utilizou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis.

As variáveis independentes estudadas foram: ângulo inicial, ângulo final e ângulo médio, as quais foram analisadas em função da condição da superfície (variável dependente): superfície fresca e superfície envelhecida após 7, 14 e 21 dias.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

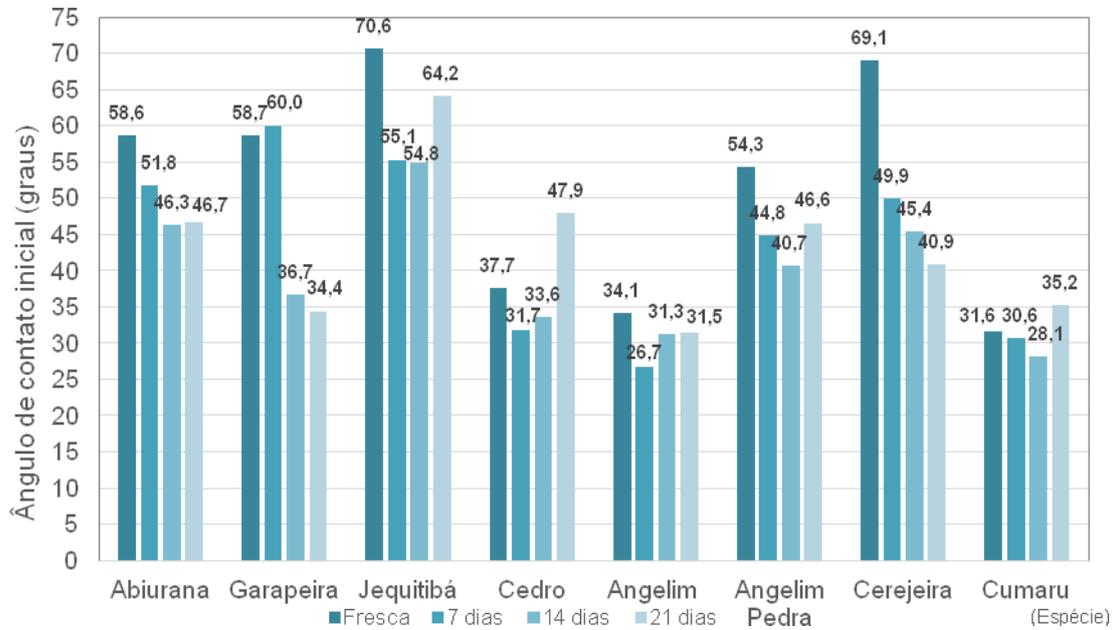
### 4.1 Efeito do envelhecimento na molhabilidade superficial da madeira

A Tabela 12 apresenta as médias dos ângulos de contato das madeiras amazônicas em função da condição da superfície (fresca e envelhecida após 7, 14 e 21 dias). Os valores de ângulo de contato da superfície das madeiras estudadas apresentaram diferenças significativas em relação ao tempo de envelhecimento, havendo alteração dos ângulos de contato inicial, final e médio. As Figuras 36, 37 e 38 mostram os ângulos de contato (inicial, final e médio) das madeiras em função da condição da superfície. As madeiras de abiurana, garapeira e cerejeira apresentaram diminuição do ângulo de contato inicial, médio e final ao longo do tempo. Enquanto as madeiras de jequitibá, angelim pedra e cumaru apresentaram diminuição até 14 dias e aos 21 apresentou aumento (Figuras 36, 37 e 38).

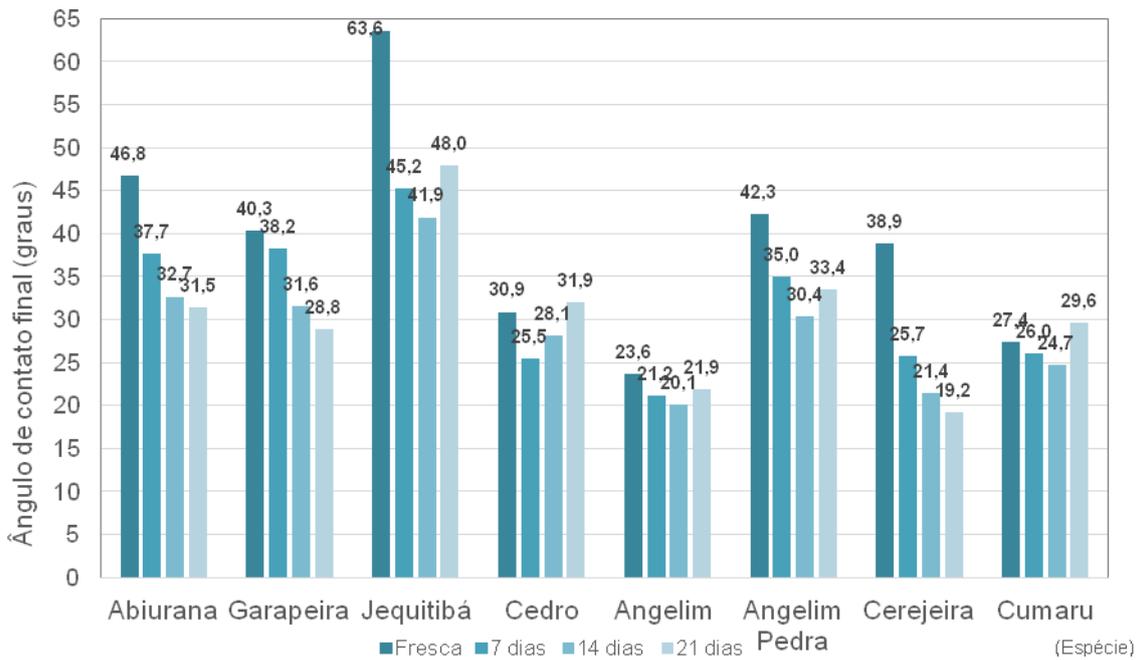
A Figura 39 mostra o comportamento dos ângulos de contato para cada madeira estudada em função das quatro condições da superfície (fresca, 7 dias, 14 dias e 21 dias). Observa-se comportamentos diferentes entre as espécies, as madeiras de abiurana, garapeira e cerejeira (Figura 39) apresentaram uma redução significativa do ângulo de contato em função do tempo de envelhecimento da superfície até 21 dias. Nas demais espécies, observa-se que a redução do ângulo de contato ocorre até 14 dias de envelhecimento da superfície, entretanto, após 21 dias o ângulo de contato aumenta. Na madeira de jequitibá (Figura 39), o ângulo da superfície envelhecida após 21 dias aumentou com relação à superfície envelhecida após 7 e 14 dias, mas manteve-se abaixo do ângulo de contato da superfície fresca. Na madeira de angelim pedra também observa-se que após 21 dias de envelhecimento, o ângulo de contato aumentou com relação ao ângulo após 14 dias de envelhecimento. Nas madeiras de cedro e cumaru, os ângulos de contato diminuíram após 7 e 14 dias de envelhecimento e em seguida aumentaram após 21 dias de envelhecimento apresentando valores superiores aqueles da superfície fresca. Os resultados mostram diferentes comportamentos entre as espécies de madeira estudadas, os quais podem ser explicados pelas suas diferentes composições químicas, principalmente em relação ao teor e a natureza dos extrativos, os quais podem se volatilizar ou migrar em direção à superfície dependendo da espécie. Por exemplo, nas madeiras de cedro e cumaru pode ter ocorrido a migração dos extrativos em direção às superfícies após 21 dias aumentando o ângulo de contato e reduzindo assim a molhabilidade; enquanto que nas demais o efeito é contrário, ou seja, com o envelhecimento da superfície pode ocorrer a volatilização dos extrativos da superfície reduzindo o ângulo de contato e favorecendo a molhabilidade. Bryne (2008), avaliando o ângulo de contato da superfície da madeira de alburno de pinus da Escócia (*Scots pine*) envelhecida durante seis meses, observou um aumento do ângulo de contato devido ao envelhecimento. O autor atribuiu esse comportamento à hidrofobicidade da madeira devido à migração dos extrativos para as superfícies, bem como a reorientação de grupos funcionais na interface madeira-extrativos-ar. Gray (1962) *apud* Piao et al. (2010) relata que as superfícies recém usinadas em condições de laboratório, apresentam maior capacidade de molhabilidade quando comparadas com superfície de madeira expostas ao ambiente externo. Frihart e Hunt (2010) descrevem que o molhamento e a penetração de adesivos são interferidos não somente por contaminação química, mas também pela deterioração física da superfície, como células esmagadas ou acúmulo de poeira ocasionado pelo lixamento. Essas condições de superfície da madeira podem ser atribuídas às amostras das madeiras estudadas, explicando a menor capacidade de molhamento das superfícies frescas. Os gráficos das madeiras de cedro, angelim e cumaru mostram que as condições de superfície em relação ao tempo não apresentam diferença,

podendo afirmar que a capacidade de molhabilidade superficial não é afetada em condições de laboratório.

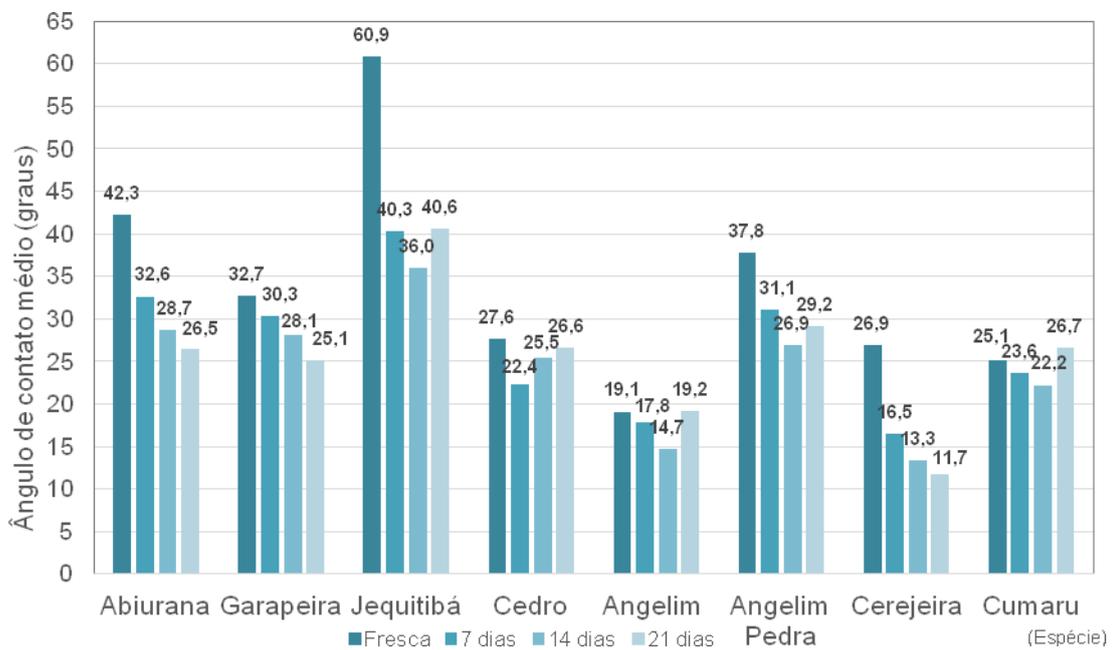
Comparando os valores de ângulos de contato das superfícies fresca entre as espécies, observa-se que a superfície das madeiras de abiuarana, jequitibá, angelim pedra e cerejeira apresentaram os maiores ângulos, i. e., uma menor molhabilidade.



**Figura 36.** Ângulo de contato inicial das madeiras amazônicas em função da condição da superfície.



**Figura 37.** Ângulo de contato final das madeiras amazônicas em função da condição da superfície.

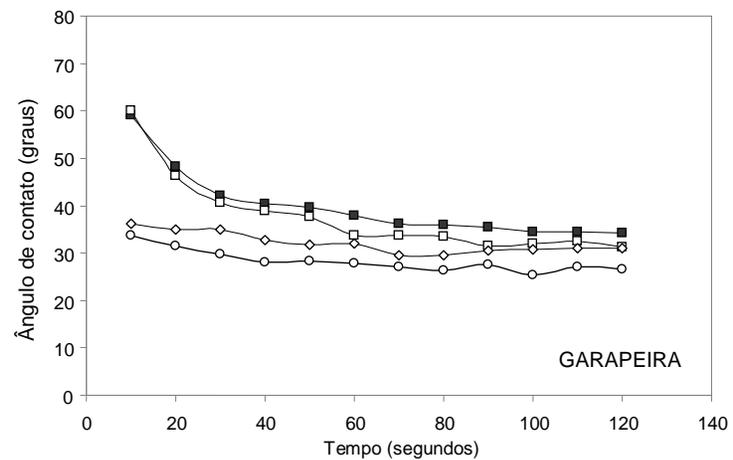
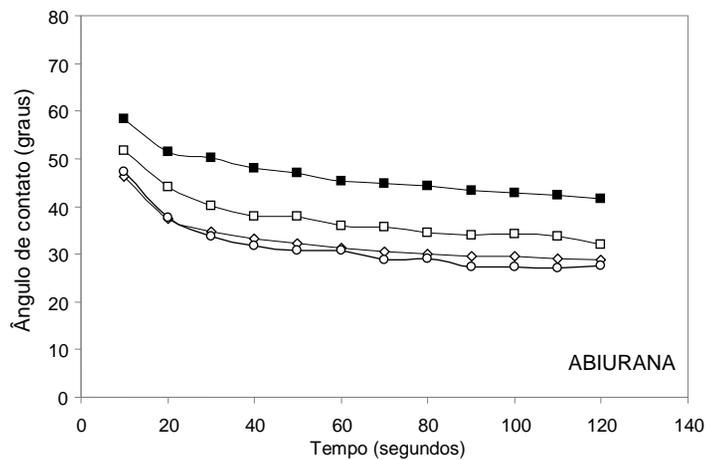


**Figura 38.** Ângulo de contato médio das madeiras amazônicas em função da condição da superfície.

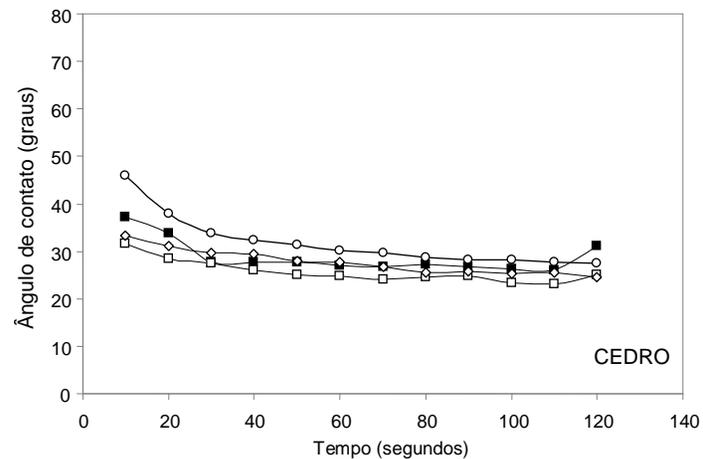
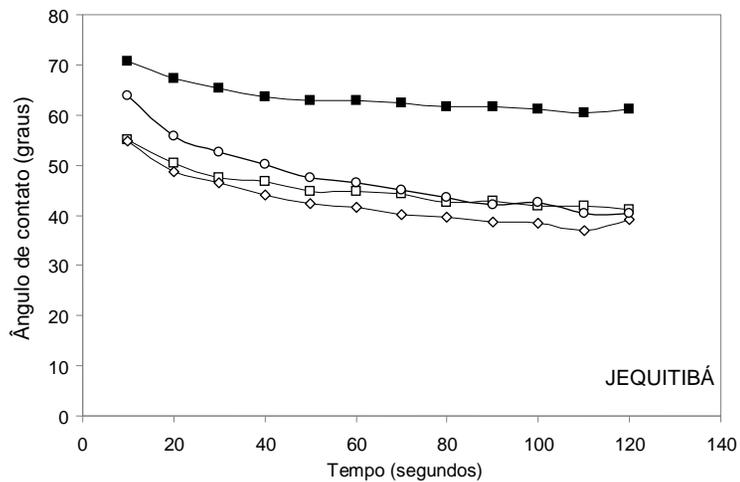
**Tabela 12.** Média de ângulos de contato das madeiras amazônicas em função da condição da superfície.

Espécie	Ângulo de contato inicial (graus)				Ângulo de contato final (graus)				Ângulo de contato médio (graus)			
	Superfície fresca	Superfície envelhecida			Superfície fresca	Superfície envelhecida			Superfície fresca	Superfície envelhecida		
		7 dias	14 dias	21 dias		7 dias	14 dias	21 dias		7 dias	14 dias	21 dias
Abiurana	58,6 Abc (12,6)	51,8 Bab (13,1)	46,3 Bab (10,8)	46,7 Bbc (13,1)	42,3 Ab (9,8)	32,6 Ba (10,7)	28,7 BCab (10,1)	26,5 Cb (9,9)	46,8 Ab (10,7)	37,7 Ba (10,6)	32,7 BCa (10,1)	31,5 Cb (10,6)
Garapeira	58,7 Abc [123,7]	60,0 Aa [126,3]	36,7 Bcd [53,2]	34,4 Bd [43,0]	32,7 Ab [103,7]	30,3 Aa [91,9]	28,1 Aab [85,4]	25,1 Bb [65,8]	40,3 Acd [115,3]	38,2 Aab [105,5]	31,6 Bab [72,9]	28,8 Bbc [53,0]
Jequitibá	70,6 Aa [145,4]	51,0 Cab [71,8]	54,8 Ca [74,7]	64,2 Ba [110,4]	60,9 Aa [155,7]	40,3 Ba [84,8]	36,0 Ba [74,2]	40,6 Ba [87,4]	63,6 Aa [152,7]	45,2 Ba [82,1]	41,9 Ba [73,9]	48,0 Ba [93,4]
Cedro	37,7 Bd [98,3]	31,7 Cc [63,2]	33,6 BCde [74,3]	47,9 Ab [152,6]	27,6 Ac [108,5]	22,4 Bb [71,6]	25,5 ABbc [100,3]	26,6 Ab [109,9]	30,9 ABd [103,3]	25,5 Cbc [67,4]	28,1 BCab [93,9]	31,9 Ab [125,0]
Angelim	34,1 Ad (8,7)	26,7 Bc (8,7)	31,3 ABde (9,9)	31,6 Ae (8,6)	19,1 Ac (6,1)	17,8 ABb (7,0)	14,3 Bc (5,7)	19,3 Ac (6,6)	23,6 Ae (5,4)	21,2 ABbc (6,9)	20,1 Bcd (5,6)	22,0 ABcd (5,3)
Angelim pedra	54,3 Ac [138,6]	44,8 BCc [91,4]	40,7 Cbcd [70,3]	46,6 Bbc [101,7]	37,8 Ab [141,7]	31,1 Ba [97,7]	26,9 Bab [73,4]	29,2 Bb [89,2]	42,3 Abc [139,9]	35,0 Ba [98,1]	30,4 Bab [71,4]	33,4 Bab [92,6]
Cerejeira	69,1 Aab [157,6]	49,9 Bab [96,5]	45,4 Babc [81,7]	40,9 Bcd [66,2]	26,9 Ab [50,1]	16,5 Bb [99,3]	13,3 Bc [81,6]	11,7 Bc [70,0]	38,9 Ad [154,1]	25,7 Bc [99,6]	21,4 BCd [80,8]	19,2 Cd [67,5]
Cumarú	31,6 ABd [100,9]	30,6 BCc [83,8]	28,1 Ce [69,3]	35,2 Ade [120,9]	25,1 ABc [101,7]	23,6 ABb [88,4]	22,2 Bc [73,5]	26,7 Ab [110,8]	27,4 ABde [102,2]	26,0 Bb [84,0]	24,7 Bbc [73,4]	29,6 Ab [115,1]

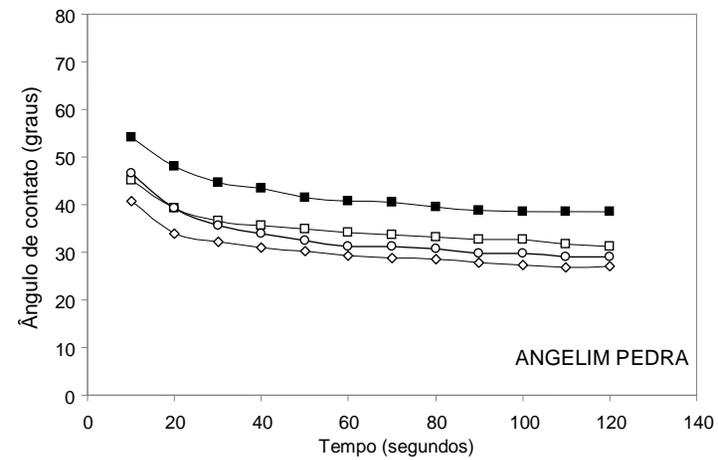
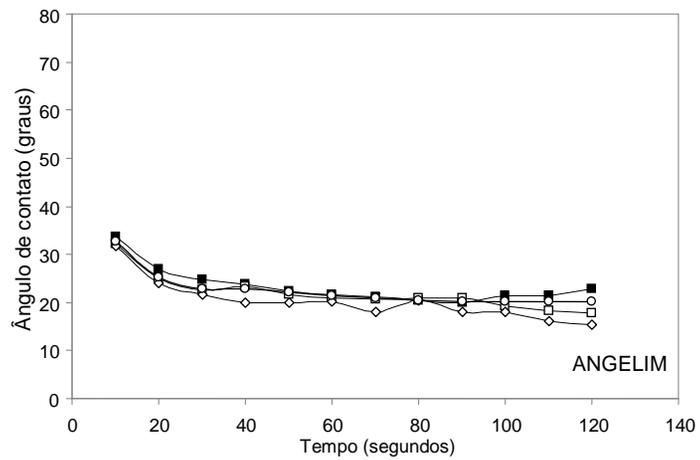
Valores entre colchetes = média dos postos obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis. Valores entre parênteses = desvio padrão. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si ( $P > 0,05$ ). Letras maiúsculas = comparação entre as condições da superfície (dentro da espécie). Letras minúsculas = comparação entre as espécies para cada condição da superfície.



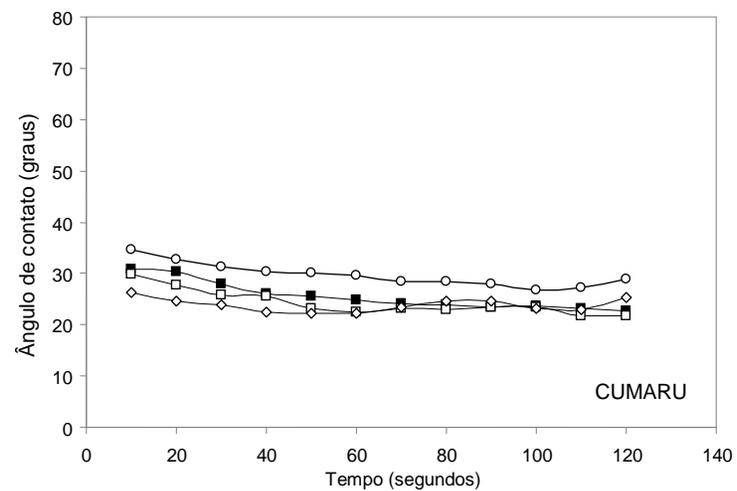
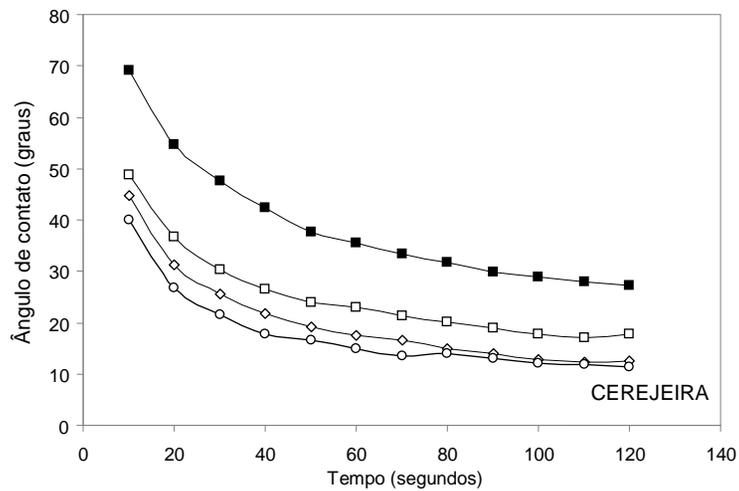
■ Superfície fresca    □ 7 dias  
 ◇ 14 dias              ○ 21 dias



Continuação na página seguinte...



■ Superfície fresca    □ 7 dias  
 ◇ 14 dias            ○ 21 dias



**Figura 39.** Comportamento do ângulo de contato das madeiras amazônicas em função do tempo e da condição da superfície.

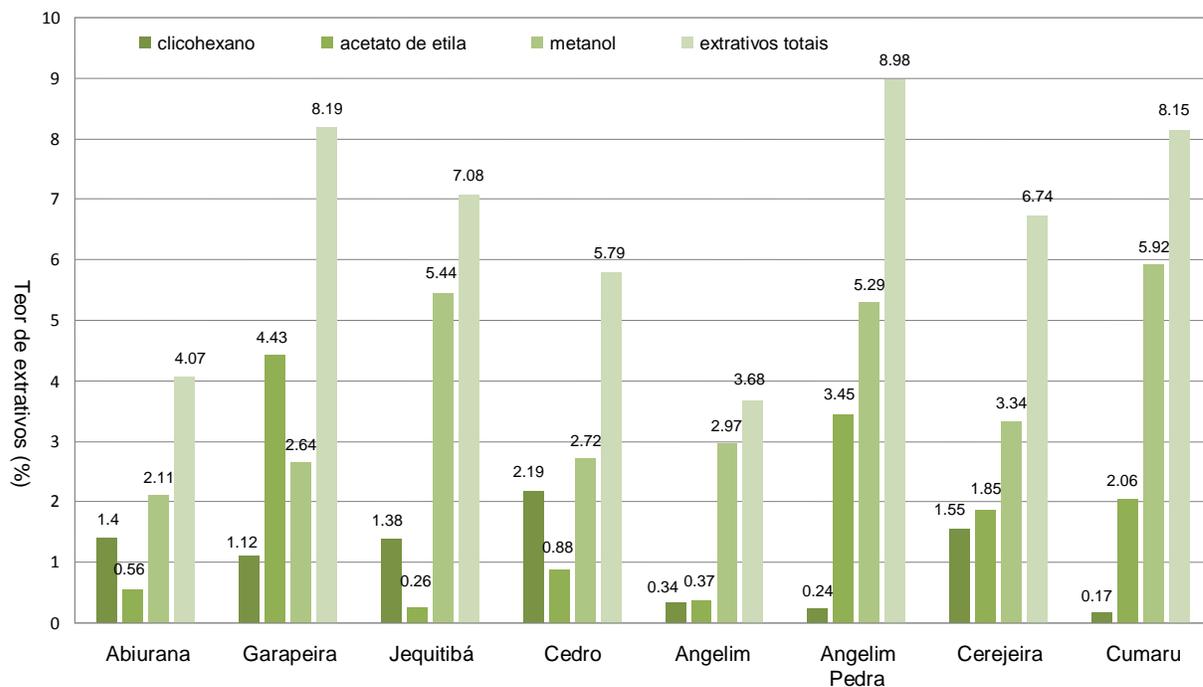
## 4.2 Análises de espectroscopia FT-IR dos extrativos

A Tabela 13 apresenta os teores de extrativos das madeiras estudadas em função do tipo de solvente (ciclohexano, acetato de etila e metanol). O ciclohexano retira os compostos não polares ou hidrofóbicos; enquanto que o metanol retira os compostos polares ou hidrofílicos (ex.: polifenóis). As madeiras de garapeira, jequitibá, angelim pedra e cumaru apresentaram os maiores teores de extrativos totais (Figura 40). Com o metanol foram obtidos os maiores teores de extrativos independente da espécie, sendo as madeiras de cumaru, jequitibá e angelim pedra com os maiores valores, respectivamente. A extração com o metanol possibilita a obtenção de maiores teores de extrativos do que a extração com os solventes ciclohexano e o acetato de etila, espera-se uma extração menor de compostos polares, conseqüentemente compostos com características hidrofílicas, favorecendo a molhabilidade superficial.

Os teores de extrativos totais das madeiras estudadas situam-se entre 3,68% (angelim) e 8,98% (angelim pedra). Conforme Klock et al. (2005), os extrativos correspondem aproximadamente entre 3 e 10% da madeira seca, podendo chegar a valores superiores a 10% nas madeiras de espécies de regiões tropicais. As madeiras de angelim pedra, garapeira e cumaru apresentaram os maiores valores de extrativos totais, respectivamente. Enquanto que, as madeiras de angelim e abiurana foram as que apresentaram os menores valores, respectivamente. A madeira de angelim apresentou o menor teor de extrativos totais, o que pode explicar a pequena variação encontrada no ângulo de contato em função do envelhecimento da superfície.

**Tabela 13.** Valores dos teores extrativos das madeiras amazônicas obtidos em extração com os solventes ciclohexano, acetato de etila e metanol.

Espécie	Teor de extrativos (%)			Teor de extrativos totais (%)
	Ciclohexano	Acetato de etila	Metanol	
Abiurana	1,40	0,56	2,11	4,07
Garapeira	1,12	4,43	2,64	8,19
Jequitibá	1,38	0,26	5,44	7,08
Cedro	2,19	0,88	2,72	5,79
Angelim	0,34	0,37	2,97	3,68
Angelim pedra	0,24	3,45	5,29	8,98
Cerejeira	1,55	1,85	3,34	6,74
Cumaru	0,17	2,06	5,92	8,15



**Figura 40.** Teor de extrativos das madeiras amazônicas.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os grupos funcionais dos componentes ativos dos extratos das madeiras amazônicas com base nos valores de pico da radiação infravermelha analisados pelos espectros FT-IR para os solventes ciclohexano e acetato de etila (Figuras 41 e 42). Os espectros dos extrativos obtidos pelo solvente metanol não puderam ser avaliados devido aos espectros apresentarem má resolução e muitos ruídos. A análise FT-IR dos extratos de madeira com o solvente ciclohexano mostrou a presença de amins, amidas, alcanos, alcenos, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres e compostos alifáticos fluorados (Tabela 14). Os resultados da análise FT-IR dos extratos de madeira com o solvente acetato de etila revelaram a presença de alcanos, alcenos, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres, compostos nitrogenados, alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres, amins e compostos alifáticos fluorados (Tabela 15).

#### *Extrato ciclohexano da madeira*

As absorções entre  $2841$  a  $2947\text{ cm}^{-1}$  são compatíveis à existência do grupo alcano, pela ligação C-H, a confirmação desse grupo vem com a identificação dos picos entre  $1449$  a  $1461\text{ cm}^{-1}$  em todas as madeiras analisadas (Tabela 14). O estiramento de C-O na frequência dos grupos álcool, éter, ácido carboxílico e éster ( $1050$ - $1300\text{ cm}^{-1}$ ), estavam presentes nos extratos de todas as madeiras estudadas. Já a ligação N-H da frequência do grupo amins e amidas ( $3412$ - $3440\text{ cm}^{-1}$ ) estava presente apenas no extrato das madeiras abiurana, cedro, angelim, angelim pedra e cerejeira. A madeira de cumaru foi a única espécie em que o extrato não apresentou o estiramento de C-F da frequência dos compostos alifáticos fluorados ( $1000$ - $1150\text{ cm}^{-1}$ ) (LOPES; FASCIO, 2004; PEDNEKAR; RAMAN, 2013; BODÍRLAU; TEACÃ, 2007).

### *Extrato acetato de etila da madeira*

As absorções entre 2927 e 2941  $\text{cm}^{-1}$  (C-H) são compatíveis à existência do grupo alciano, a confirmação desse grupo vem com a identificação dos picos entre 1452 a 1484  $\text{cm}^{-1}$  (Tabela 15). A presença da ligação C-O é compatível aos grupos alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres nas absorções entre 1240 a 1251  $\text{cm}^{-1}$ , havendo uma confirmação desses grupos nas absorções 1160, 1162, 1181, 1179  $\text{cm}^{-1}$  para as madeiras de angelim, angelim pedra, cerejeira e cumaru respectivamente e nas absorções 1078, 1087, 1102  $\text{cm}^{-1}$  para as madeiras de angelim pedra, cerejeira e cumaru, respectivamente. As absorções entre 817 a 837  $\text{cm}^{-1}$  são compatíveis à presença do anel aromático (C-H), apresentando em todos extratos das madeiras. A ligação C=O na frequência do grupo aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres nas absorções entre 1729, 1725 e 1724  $\text{cm}^{-1}$ , estavam presentes apenas nos extratos das madeiras de garapeira, cedro e cumaru, respectivamente. A presença de  $\text{NO}_2$  dos compostos nitrogenados identificados através do pico 1339  $\text{cm}^{-1}$  estava presente apenas nos extratos da madeira de jequitibá. As absorções entre 1032 a 1044  $\text{cm}^{-1}$  são compatíveis com a existência do grupo amins primárias, pelo estiramento de C-N não sendo constatado somente no extrato de madeira de garapeira. Esta madeira apresentou absorções a 1002  $\text{cm}^{-1}$  indicando a presença do estiramento de C-F que é atribuído aos compostos alifáticos fluorados (1000-1150  $\text{cm}^{-1}$ ) (LOPES; FASCIO, 2004; PEDNEKAR; RAMAN, 2013; BODÏRLAU; TEACÃ, 2007).

**Tabela 14.** Valores de pico da radiação infravermelha analisados pelos espectros FT-IR para o solvente ciclohexano, os grupos funcionais e a atribuição da banda.

Número de ondas (cm <sup>-1</sup> )								Ligação	Atribuição da banda
Abiurana	Garapeira	Jequitibá	Cedro	Angelim	Angelim pedra	Cerejeira	Cumarú		
3412	-	-	3437	3413	3436	3440	-	N-H	Aminas e amidas <sup>[1]</sup> ; álcool <sup>[2]</sup>
-	3155	-	3157	-	-	3156	-		
<b>2927</b>	<b>2933</b>	<b>2933</b>	<b>2947</b>	<b>2933</b>	<b>2933</b>	<b>2945</b>	<b>2933</b>	<b>C-H</b>	<b>Alcanos<sup>[1]</sup>; metil e metilenos<sup>[2]</sup></b>
<b>2854</b>	<b>2854</b>	<b>2862</b>	<b>2841</b>	<b>2853</b>	<b>2861</b>	<b>2842</b>	<b>2862</b>	<b>C-H</b>	<b>Alcanos<sup>[1]</sup>; CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> -</b>
1735	1736	1736	1738	1734	-	1738	1737	C=O	Aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup> ; carbonila <sup>[2]</sup>
-	-	-	-	-	1719	-	-	C=O	Aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup>
1640	-	-	1640	1623	1626	1639	-	C=C	Alcenos <sup>[1, 2]</sup>
-	-	-	-	-	1596	-	-		Ácidos carboxílicos
1607	-	-	-	-	-	1604	-	C=C	Alcenos <sup>[1]</sup>
-	-	-	-	-	-	-	1562		
<b>1461</b>	<b>1450</b>	<b>1451</b>	<b>1449</b>	<b>1459</b>	<b>1450</b>	<b>1449</b>	<b>1460</b>	<b>C-H</b>	<b>Alcanos<sup>[1]</sup>; éter</b>
-	-	-	-	1402	-	-	-	C-H	Alcanos <sup>[1]</sup>
1377	1377	1377	1376	1381	-	1377	-	C-H	Alcanos <sup>[1]</sup>
						1355	1346	C-H	Alcanos <sup>[1]</sup>
<b>1248</b>	<b>1257</b>	<b>1258</b>	<b>1257</b>	<b>1273</b>	<b>1257</b>	<b>1257</b>	<b>1259</b>	<b>Estiramento de C-O</b>	<b>Alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos, ésteres<sup>[1]</sup>, fenóis<sup>[2]</sup></b>
1177	1176	1175	-	-	-	1181			Alcoóis terciários
-	-	-	1164	-	-	1167	-	Estiramento de C-O	Álcool, éter, ácido carboxílico, éster <sup>[1]</sup>
1100	1113	-	1108	1104	1107	1108	1111		Alcoóis secundários
-	-	-		1078	-	-	-	Estiramento de C-O	Álcool primário, éter, ácido carboxílico, éster <sup>[1]</sup>
1042	1039	1036	1039	1055	1039	1039	-	Estiramento de C-F	Compostos alifáticos fluorados – aril éter <sup>[1]</sup>
-	-	-	-	-	-	1019	-		

-	982	-	-	-	-	-	955	C=C	Alcenos <sup>[1]</sup>
-	-	903	-	903	-	903	903	C=C	Alcenos <sup>[1]</sup>
887	861	862	861	-	861	861	885	C=C	Alcenos <sup>[1]</sup>
753	-	-	-	-	-	-	798	C-H	Anel aromático <sup>[1]</sup>
<b>722</b>	<b>721</b>	<b>722</b>	<b>722</b>	<b>716</b>	<b>718</b>	<b>722</b>	<b>724</b>	C-H	Anel aromático <sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> Pednekar; Raman (2013); <sup>[2]</sup> Bodîrlau; Teacă (2007). Valores de picos em azul são comuns à todas as espécies.

**Tabela 15.** Valores de pico da radiação infravermelha analisados pelos espectros FT-IR para o solvente acetato de etila, os grupos funcionais e a atribuição da banda.

Número de ondas (cm <sup>-1</sup> )								Ligação	Atribuição da banda
Abiurana	Garapeira	Jequitibá	Cedro	Angelim	Angelim pedra	Cerejeira	Cumarú		
<b>3286</b>	<b>3376</b>	<b>3263</b>	<b>3402</b>	<b>3377</b>	<b>3350</b>	<b>3238</b>	<b>3260</b>	<b>O-H</b>	<b>O-H associado e grupo H-X<sup>[1]</sup></b>
2986	2982							O-H	O-H associado e grupo H-X <sup>[1]</sup>
<b>2939</b>	<b>2941</b>	<b>2929</b>	<b>2934</b>	<b>2936</b>	<b>2927</b>	<b>2937</b>	<b>2940</b>	<b>C-H</b>	<b>Alcanos<sup>[1]</sup></b>
-	2845	2854	-	2849	-	-	-	C-H	Alcanos <sup>[1]</sup>
-	1729	-	1725	-	-	-	1724	C=O	Adeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup> ; alcenos <sup>[2]</sup>
1710	-	1703	-	1714	1708	1711	-	C=O	Aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup>
-	1659	-	-	-	-	1642	-	C=C	Alcenos <sup>[1]</sup>
1613	1601	1608	1612		1613	1612	-	C=C	Alcenos <sup>[1]</sup>
				1621				C=C	Alcenos <sup>[2]</sup>
-	-	-	-	-	-	-	1596	C=C	Anel aromático <sup>[1]</sup>
1515	-	1514	1515	1514	1514	1515	1513	C=C	Anel aromático <sup>[1, 2]</sup>
<b>1449</b>	<b>1484</b>	<b>1454</b>	<b>1452</b>	<b>1462</b>	<b>1454</b>	<b>1452</b>	<b>1464</b>	<b>C-H</b>	<b>Alcanos<sup>[1]</sup></b>
1374	1368	-	1375	1382	1375	1373	1376	C-H	Alcanos <sup>[1]</sup>
-	-	1339	-	-	-	-	-	NO <sub>2</sub>	Compostos nitrogenados <sup>[1]</sup>
<b>1243</b>	<b>1253</b>	<b>1240</b>	<b>1250</b>	<b>1251</b>	<b>1250</b>	<b>1250</b>	<b>1247</b>	<b>C-O</b>	<b>Alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres<sup>[1]</sup>; composto fenólico<sup>[2]</sup></b>
-	1165	-	-	1160	1162	1181	1179	C-O	Alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup>
-	-	1118	1113	1117	1118	-	-	C-O	Alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup>
1097	-	-	-	-	1078	1087	1102	C-O	Alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres <sup>[1]</sup>
1042	-	1036	1044	1032	1041	1044	1042	Estiramento de C-N	Aminas primárias <sup>[1]</sup>
-	1002	-	-	-	-	-	-	Estiramento de C-F	Compostos alifáticos fluorados <sup>[1]</sup>
939	937	-	-	947	-	-	-	C-H	Alcenos <sup>[1]</sup>

-	-	-	870	-	-	883	-	C-H	Anel aromático <sup>[1]</sup>
<b>848</b>	<b>818</b>	-	<b>817</b>	<b>835</b>	<b>837</b>	<b>836</b>	<b>834</b>	<b>C-H</b>	<b>Anel aromático<sup>[1]</sup></b>
785	-	773	-	-	-	-	790	C-H	Anel aromático <sup>[1]</sup>
-	-	-	-	730	-	-	-	C-H	Anel aromático <sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> Pednekar; Raman (2013); <sup>[2]</sup> Bodîrlau; Teacă (2007). Valores de picos em azul são comuns à todas as espécies.

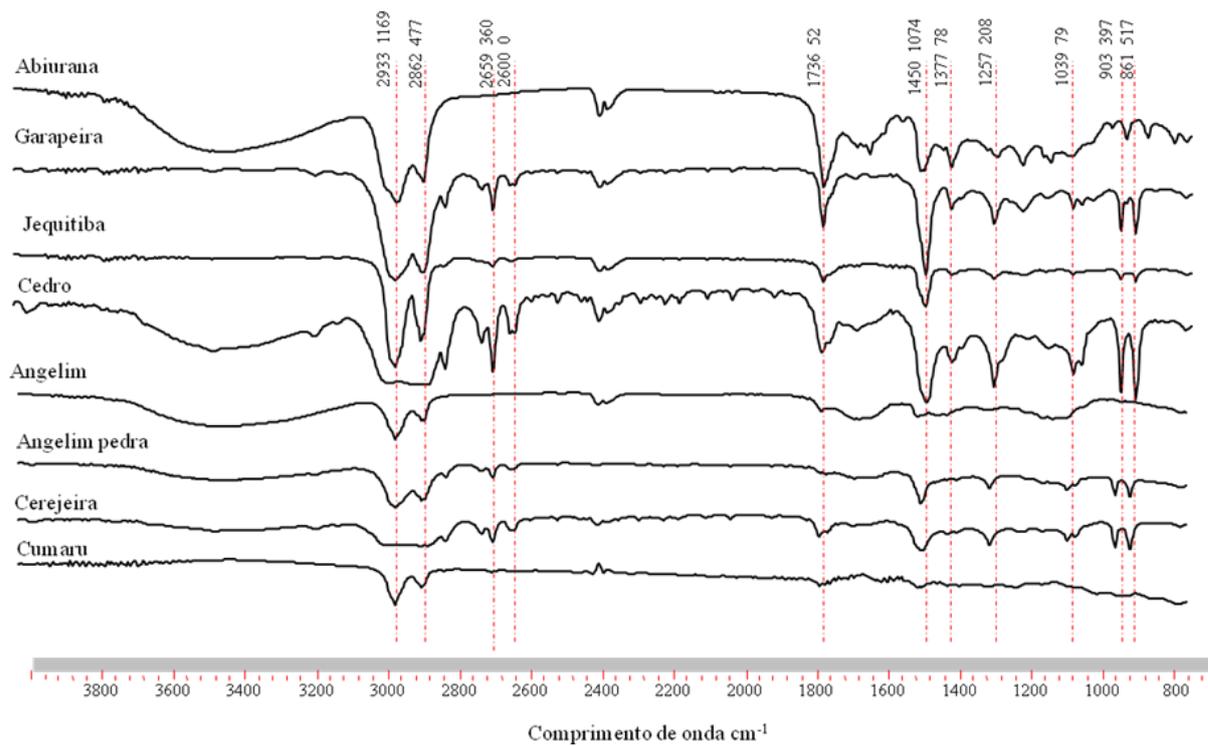
A Figura 41 apresenta os espectros FT-IR dos extratos solúveis em ciclohexano das madeiras amazônicas. Observa-se nas oito espécies de madeiras bandas localizadas na região de impressão digital que varia entre 3000 a 2600  $\text{cm}^{-1}$  e entre 1800 a 800  $\text{cm}^{-1}$ . Alguns compostos encontrados nos espectros dos extratos solúveis em ciclohexano (Figura 41) apresentam constituintes caracterizados como hidrofóbicos, tais como ácidos graxos, esteroides e ésteres (PIAO et al., 2010), os quais podem ser responsáveis pela inativação da superfície.

Na Figura 41 são evidenciados os compostos que apresentam características hidrofóbicas mostrando as maiores intensidades para cada madeira. É evidenciado a absorção nas bandas 2933  $\text{cm}^{-1}$  e 2862  $\text{cm}^{-1}$  e uma banda larga de 1450  $\text{cm}^{-1}$  a 1377  $\text{cm}^{-1}$  indicativo da presença de alcanos, evidenciados em quase todos os espectros das madeiras diferindo apenas nas intensidades para as madeiras abiurana, garapeira, jequitibá e cedro. Já a absorção de cetonas, ésteres e aldeídos nas bandas 1736  $\text{cm}^{-1}$  só não foi observado na madeira de angelim pedra, com maiores intensidades nas madeiras, abiurana, garapeira e cedro. Foram também evidenciados a presença compostos fenólicos (1257  $\text{cm}^{-1}$ ) em todas as madeiras, porém suas intensidades são maiores para as madeiras de garapeira e cedro. As absorções na banda de 1039  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento de C-F) evidencia a presença de compostos alifáticos fluorados (formados por cadeias longas) com maiores intensidades nas madeiras de garapeira e cedro.

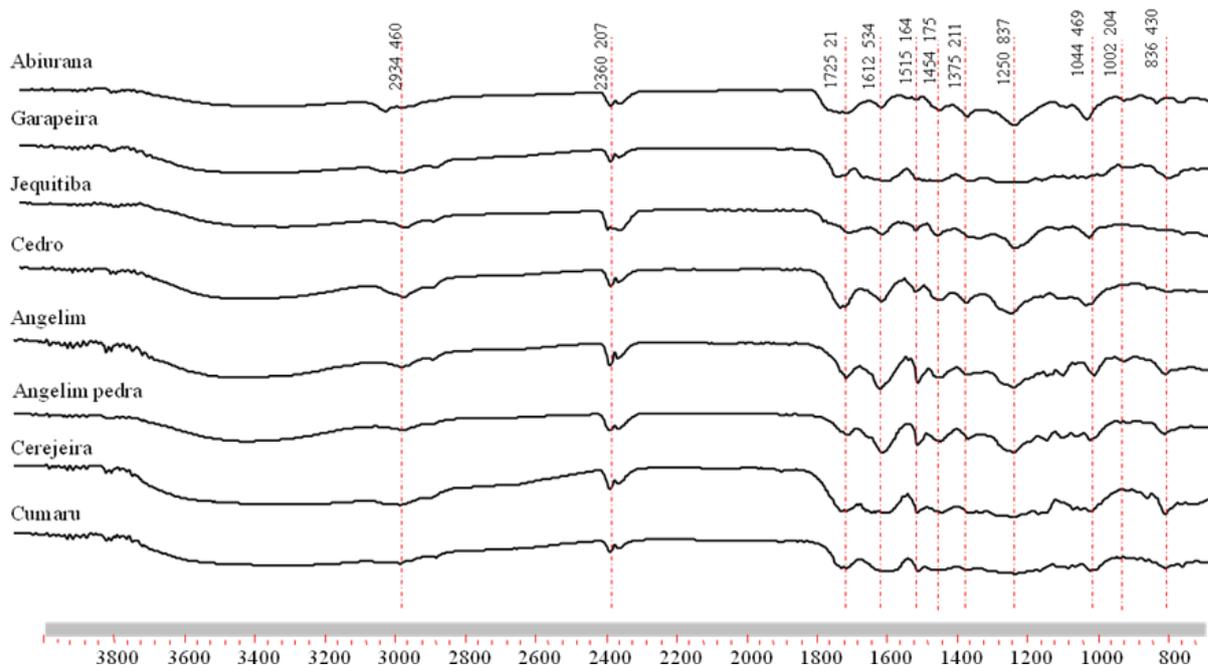
Observa-se que as madeiras angelim e cumaru são as que mostram as menores intensidades dos compostos com características hidrofóbicas nos espectros, essas madeiras estão entre as que apresentaram os menores ângulos de contato médio na superfície fresca (Figura 38), mostrando que a ausência desses grupos funcionais pode ter sido fundamentais para um caráter menos hidrofóbico à essas madeiras.

Os espectros no infravermelho dos extratos da madeira obtidos em acetato de etila apresentaram bandas de absorção bem diferentes dos espectros dos extratos da madeira obtidos em ciclohexano. Na Figura 42 são evidenciados os compostos e suas intensidades para cada madeira. As absorções nas bandas 2934  $\text{cm}^{-1}$  e 1454  $\text{cm}^{-1}$  referentes à presença de alcanos sendo evidenciado em todas os espectros das madeiras, mostram intensidades diferenciadas nas madeiras de jequitibá, cedro, angelim e angelim pedra. Bandas largas entre 1725  $\text{cm}^{-1}$  e 1703  $\text{cm}^{-1}$  referentes a aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres estão presentes em todos os espectros das madeiras, mostrando um caráter hidrofóbico. A presença de alcenos também é bem característica desse espectro, com maiores intensidades nas bandas 1612  $\text{cm}^{-1}$  e 1621  $\text{cm}^{-1}$ . Compostos como alcoóis, éteres, ácidos carboxílicos e ésteres são evidenciados em bandas entre 1250  $\text{cm}^{-1}$  a 1240  $\text{cm}^{-1}$ , com menores intensidades nas madeiras de garapeira, cerejeira e cumaru. Os compostos alifáticos fluorados (estiramento de C-F na banda 1002  $\text{cm}^{-1}$ ) assim como no espectro do extrato solúvel em ciclohexano, são evidenciados no espectro do extrato solúvel em acetato de etila, porém somente a madeira de garapeira apresenta tal composto.

No espectro mostrado na Figura 42, apresenta ainda compostos com caráter hidrofílico que são as aminas, compostos nitrogenados polares em pequenas quantidades nos extrativos da madeira (KLOCK, 2010) e os anéis aromáticos nas bandas 836  $\text{cm}^{-1}$  a 848  $\text{cm}^{-1}$ , que podem ser evidenciadas em maiores intensidades nas madeiras de garapeira, angelim, angelim pedra e cerejeira.



**Figura 41.** Espectro FT-IR dos extratos das madeiras amazônicas obtidos em solvente ciclohexano.



**Figura 42.** Espectro FT-IR dos extratos das madeiras amazônicas obtidos em solvente acetato de etila.

## 5 CONCLUSÕES

O envelhecimento não afetou a molhabilidade superficial da madeira de angelim, portanto, ela pode ser estocada em ambiente controlado por pelo menos 21 dias sem sofrer inativação da superfície.

O teor de extrativos não foi o fator mais relevante para a inativação da superfície e sim a natureza dos extrativos (grupos funcionais).

As análises FT-IR dos extratos das madeiras de angelim e cumaru mostram menores intensidades para grupos funcionais de caráter hidrofóbico atribuindo a estas uma maior molhabilidade (menor ângulo de contato).

## CONCLUSÕES GERAIS

A análise da componente principal separou as madeiras em três grupos em que o diâmetro tangencial médio e a frequência média dos poros foram as variáveis mais importantes.

O lixamento diminuiu a rugosidade superficial das madeiras para todos os parâmetros, exceto para o parâmetro  $R_v$  (vale mais profundo no comprimento de medição) das madeiras de angelim pedra e cumaru, por apresentarem densidades altas e diâmetros tangenciais de vasos grandes.

A textura afetou os parâmetros  $R_a$  (rugosidade média) e  $R_p$  (distância vertical do pico mais alto no comprimento de medição) das superfícies aplainadas e todos os parâmetros de rugosidade na superfície lixada.

As madeiras de textura fina apresentaram menor rugosidade superficial que as madeiras de textura grossa.

A avaliação visual apresentou uma correlação significativa com o parâmetro  $R_a$ , independentemente do tipo de preparo.

A estrutura anatômica afetou na rugosidade superficial das madeiras nos parâmetros relacionados à profundidade, tendo como destaque a frequência média de poros. A separação dos grupos pela análise da componente principal, das variáveis anatômicas, correspondeu parcialmente ao agrupamento dado pelos valores médios de rugosidade superficial das madeiras amazônicas estudadas.

As superfícies lixadas apresentaram maior molhabilidade (menor valores de ângulo de contato) em relação às superfícies aplainadas independente da espécie.

A textura da madeira apresentou correlação significativa com os ângulos de contato em que as madeiras de textura fina apresentaram menor molhabilidade.

Os parâmetros de rugosidade superficial têm uma influência sobre a molhabilidade das madeiras, porém esses parâmetros devem ser associados a outras características como o preparo da superfície da madeira e textura da madeira.

O envelhecimento não afetou a molhabilidade superficial da madeira de angelim, portanto, ela pode ser estocada em ambiente controlado por pelo menos 21 dias sem sofrer inativação da superfície.

Os teores de extrativos não foi o fator mais relevante para a inativação da superfície e sim a natureza dos extrativos (grupos funcionais).

As análises FT-IR dos extratos das madeiras de angelim e cumaru mostram menores intensidades para grupos funcionais de caráter hidrofóbico atribuindo a estas uma maior molhabilidade (menor ângulo de contato).

Este estudo mostrou a complexidade dos fatores físicos e químicos envolvidos no fenômeno de molhabilidade da superfície da madeira.

A interação entre os fatores físicos e químicos e a molhabilidade superficial é dependente da espécie e devem ser analisados em conjunto.

A textura da madeira e a usinagem foram os principais fatores afetando a rugosidade da superfície.

A rugosidade da superfície e a natureza dos grupos funcionais dos extrativos tiveram um efeito importante na molhabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMÓVEL. **Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário: relatório das atividades desenvolvidas em 2014**. São Bento do Sul, 2014.

ABREU, H. S. **Biossíntese da lignificação**, Editora Universidade Rural, 1994, 60 p.

ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente - SEMA. **O Acre: no caminho da sustentabilidade**. Rio Branco; 2012.

ACRE. Secretaria de Estado de Planejamento – SEPLAN. **Acre em números**. Rio Branco, 2013.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 807-815, 2012.

AMBIENTE BRASIL. **Floresta Amazônica – localização**. Disponível em: [http://www.ambientesambientebrasil.com.br/amazonia/floresta\\_amazonica/floresta\\_amazonica\\_-\\_localizacao.html](http://www.ambientesambientebrasil.com.br/amazonia/floresta_amazonica/floresta_amazonica_-_localizacao.html). 2015. Acesso em: 17 out 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1666-2011: Standard method for conducting machining tests of Wood and wood base materials**. Philadelphia: ASTM Standards, 2011. p. 226-245.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2395-93: Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials**. ASTM Standards, 1999. p. 350-357.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2395-93: Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials**. ASTM Standards, 1999. p. 350-357.

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. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 99-109, 2013.

ARAÚJO, H. J. B.; CORREIA, M. F. Índices técnicos e econômicos da colheita madeireira com microtrator substituindo animais em manejo florestal comunitário. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 2, p. 146-155, abr/jun. 2014.

ARNOLD, M. Planing and sanding of wood surfaces – effects on surface properties and coating performance. In: PRA'S 7<sup>TH</sup> INTERNATIONAL WOOD COATINGS CONGRESS – REDUCING THE ENVIRONMENTAL FOOTPRINT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287 Especificações geométricas dos produtos (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287 Especificações geométricas dos produtos (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288: especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro, Nov. 2008.

BAJIC, D.; LELA, B.; ZIVKOVIC, D. Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling. **Metalurgija**, v. 47, n. 4, p. 331-334, 2008.

BHUSHAN, B. **Surface roughness analysis and measurement techniques**. In: Modern Tribology Handbook. CRC Press LLC, 2001.

BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Revista Floresta**, Curitiba – PR, v. 37, n. 1, jan/abr. 2007.

BIOLIN SCIENTIFIC. 2016. **Roughness corrected contact angle**. Disponível em: <http://www.biolinscientific.com/application/surface-roughness-measurement/#ISO> Acesso em 29 nov 2016.

BODÎRLAU; R.; C. A., TEACĂ. Fourier Transform Infrared Spectroscopy and thermal analysis of lignocellulose fillers treated with organic anhydrides. **Romanian Journal of Physics**, v. 54, n. 1-2, p. 93-104, Bucharest, 2009.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, v. 1, p. 1039, 2003.

COOL, J.; HERNÁNDEZ, R. Performance of three alternative surfacing processes on black spruce wood and their effects on water-based coating adhesion. **Wood Fiber Science** . v.43, n. 4, p. 365-378, 2011.

COPANT. **Comissão Panamericana de Normas Técnicas: descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira – esquema I de recomendação**. Colômbia, p. 19, (COPANT 30) 1973.

CORADIN, V. T. R.; MUÑIZ, G. I. B. **Normas para procedimentos em estudos de anatomia de madeira: I. Angiospermae. II. Gimnospermae**. Brasília: IBAMA/LPF, 1992. (Série Técnica, 15).

COSTA, M. A.; COSTA, A. F.; PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 567-577, 2011.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. **Quality of machined wood surfaces**. Springer International Publishing Switzerland, 2015.

CUSTÓDIO, M. C. **Maderas para pisos**. Primeira edición, Perú, p. 176, 2005.

DE MOURA, L. F.; HERNÁNDEZ, R. E. Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 355-366, 2005.

DE MOURA, L. F.; HERNÁNDEZ, R. E. Evaluation of varnish coating performance for three surfacing methods on sugar maple wood. **Forest Products Journal**, v. 56, n. 11/12, p. 130-136, 2006.

DENES, F. S.; CRUZ-BARBA, L. E.; MANOLACHE, S. Plasma treatment of wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.

DUNDAR, T.; AKBULUT, T.; KORKUT, S. The effects of some manufacturing factors on surface roughness of sliced Makoré (*Tieghemella heckelii* Pierre Ex A. Chev.) and rotary-cut beech (*Fagus orientalis* L.) veneers. **Building and Environment**, v. 43, p. 469-474, 2008.

FOREST PRODUCTS LABORATORY – FPL. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2010. 508 p.

FORM Talysurf Series operator's handbook. RANK Taylor Hobson Limited. Publication nº RTH-HB-100, handbook revision 01.00 applicable to software version 01.xx., England. 359p. 1985.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, R. M. (Ed.) **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2005.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesive with wood materials – bond formation and performance. Chapter 10. In: **Wood Handbook – Wood as an engineering material**. Forest Products Laboratory. 2010.

FUJIWARA, Y.; FUJII, Y.; OKUMURA, S. Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surfaces of wood. **Forest Products Journal**, v. 53, p. 58-62, 2003.

FUJIWARA, Y.; FUJII, Y.; OKUMURA, Y. Relationship between roughness parameters based on material ratio curve and tactile roughness for sanded surfaces of two hardwoods. **J. Wood Science**, v. 51, p. 274-277, 2005.

FUJIWARA, Y.; FUJII, Y.; SAWADA, Y.; OKUMURA, S. Assessment of wood surface roughness: comparison of tactile roughness and three-dimensional parameters derived using a robust Gaussian regression filter. **Journal of Wood Science**, v. 50, p. 35-40, 2004.

GRAY, V. R. The wettability of wood. **Forest Products Journal**, v. 12, n. 9, p. 452-461, 1992.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Filtering the roughness of a sanded wood surface. **Holz Roh Werkst.**, n. 64, p. 363-371, 2006.

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

HERNÁNDEZ, R. E.; LLAVÉ, A. M.; KOUBAA, A. Effects of cutting parameters on cutting forces and surface quality of black spruce cants. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, p. 107-116, 2014.

HERNÁNDEZ, R.E.; COOL, J. Evaluation of three surfacing methods on paper birch wood in relation to water and solvent-borne coating performance. **Wood and Fiber Science**, v. 40, n. 3, p. 459-469, 2008.

HSU, C. –P. S. Infrared Spectroscopy. Chapter 15. In: SETTLE, F. A. **Handbook of instrumental techniques for analytical chemistry**. 1997.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS – IAWA Committee. IAWA List of microscopic features for hardwood identification. Eds: WHEELER, E. A.; BAAS, P.; GASSON, P. E. **IAWA Journal**, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11664-4:2008 Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* Colour space.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil. São Paulo, 2013.

ISKRA, P.; HERNÁNDEZ, R. E. The influence of cutting parameters on the surface quality of routed paper birch and surface roughness prediction modeling. **Wood and Fiber Science**, v. 41, n. 1, p. 28-37, 2009.

JAIC, M.; PALIJA, T.; DORDEVIC, M. **The impact of surface preparation of wood on the adhesion of certain types of coatings**. Conference paper, 2014.

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, v. 41, n. 8, p. 1074-1078, 2006.

KLOCK, U. **Química da Madeira**. 4 edição, Curitiba, 2013.

KRÜSS GmbH. **Software for drop shape analysis DSA 1 v 1.92 for contact angle measurements systems**. User manual v1.92-05. 2011.

KÚDELA, J. Wetting of wood surface by liquids of different polarity. **Wood Research**, v. 59, n. 1, p. 11-24, 2014.

LATTHE, S. S.; TERASHIMA, C.; NAKATA, K.; FUJISHIMA, A. Superhydrophobic surfaces developed by mimicking hierarchical surface morphology of lotus leaf. **Molecules**, v. 19, p. 4256-4283, 2014.

LEMASTER, R. L.; BEALL, F. C. The use of an optical profilometer to measure surface roughness in medium density fiberboard. **Forest Product Journal**, v. 46, n.11/12, p.73-80, 1996.

- LIMA, A.; BAKKER, J. Espectroscopia no infravermelho próximo para a monitorização da perfusão tecidual. **Revista Brasileira de Terapia Intensiva**, v. 23, n. 3, p. 341-351, 2011.
- LIU, F. P.; RIALS, T.G.; SIMONSEN, J. **Relationship surface energy to surface composition**. *Langmuir*, v. 14, p. 536-541. 1998.
- LOPES, W. A.; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química Nova**, v. 27, n. 4, p. 670-673, 2004.
- LUZ, A. P; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. **Cerâmica**, n. 54, p. 174-183, 2008.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; da SILVA, M. B.; RUFFINO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, p. 384, 2009.
- MAGOSS, E. General regularities of wood surface roughness. **Acta Silv. Lign. Hung.**, v. 4, p. 81-93, 2008.
- MANIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. Ed. 2, São Paulo, 1989.
- MARRA, A. A. **Technology of Wood Bonding: Principles in Practice**. Van Nostrand Reinhold. New York, p.454, 1992.
- MARTINS, C. R.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. Solubilidade das substâncias orgânicas. **Química Nova**, v. 36, n. 8, p. 1248-1255, 2013.
- MARTINS, D. A. L. **Caracterização de madeiras exóticas para acabamento com vernizes aquosos**. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, [s.l.].
- MARTINS, S. A.; FERRAZ, J. M; SANTOS, C. M. T; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Efeito da usinagem na rugosidade da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii*. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 135-143, 2011.
- MEIJER, M.; THURICH, K.; MILITZ, H. Comparative study on penetration characteristics of modern wood coatings. **Wood Science and Technology**, n. 32, v. 5, p. 347-365, 1998.
- 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). **Revista Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 2, p. 238-249, 2013.
- MUÑIZ, G. I. B.; CARNEIRO, M. E.; NISGOSKI, S.; RAMIREZ, M. G. L.; MAGALHÃES, W. L. E. SEM e NIR characterization of four fores species charcoal. **Wood Science and technology**, v.1, p.10, 2013.

NICOLET. **Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry**. Thermo: Electron Corporation. 2001.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B.; MORRONE, S. R.; SCHARDOSIN, F. Z.; FRANÇA, R. F. NIR and anatomy of Wood and charcoal from Moraceae and Euphorbiaceae species. **Ciência da Madeira** (*Brazilian Journal of Wood Science*), v. 6, n. 3, p. 183-190, 2015.

PEDNEKAR, P. A.; RAMAN, B. The FT-IR spectrometric studies of vibrational bands of *Semecarpus anacardium* Linn. F., stem powder and extracts. **Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research**, v. 6, n. 1, p. 159-198, 2013.

PEREIRA, D.; SANTOS, D.; VEDOVETO, M.; GUIMARÃES, J.; VERÍSSIMO, A. Fatos florestais da Amazônia 2010. Belém-PA, **IMAZON**, 2010.

PETROPOULOS, G. P. Multi-parameter analysis and modeling of engineering surface texture. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 24, n. 1, p. 91-100, 2007.

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**, v. 42, 4, p. 490-510, 2010.

QUINELATO, C. **Métodos da extração da lignina do bagaço da cana-de-açúcar da região noroeste do estado de São Paulo**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2016.

REMADE. **Madeiras peruanas e exóticas**. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/538/madeiras-peruanas-e-exoticas/cachimbo-blanco>> Acesso em 22/05/2013.

RIBEIRO, C. M. R.; SOUZA, N. A. Esquema geral para elucidação de substâncias orgânicas usando métodos espectroscópico e espectrométrico. **Química Nova**, v. 30, n. 4, p. 1026-1031, 2007.

ROBERT, R. C. G.; SANTOS, A. S.; SANTOS, L. D.; FANTINI, A. C. Caracterização do abastecimento de madeira serrada comercializada no município de Florianópolis – SC. **Revista Floresta**, v. 42, n. 1, p. 85-94, 2012.

ROWELL, R. M. Can the Cell Wall be Stabilized? In: Suchsland, Otto, ed. **Wood science seminar 1: Stabilization of the wood cell wall**. East Lansing, MI: Michigan State University. F. Forest Products Laboratory. Forest Service U.S. Department of Agriculture. Madison, WI. 1988.

SANTOS, R. C. Resíduos da indústria madeireira do Acre. Rio Branco, AC: **FUNTAC**, p. 65, 2007. Serviço Florestal Brasileiro. Produção Florestal. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>> Acesso em: 15 de abr 2015.

SANTONI, I.; PIZZO, B. Effect of surface conditions related to machining and exposure on wettability of different Mediterranean Wood species. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, p. 743-753, 2011.

SARTO, C.; SANSIGOLO, C. A. Cinética da remoção dos extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante polpação Kraft. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 32, n. 3, p. 227-235, 2010.

SENAI. **Rugosidade superficial**. Federação da Indústria do Estado do Rio Grande do Sul – FIERGS. 2010.

SERNEK, M. **Comparative analysis of inactivated wood surfaces**. 2002. 179f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Wood Science and Forest Products), Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2002.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Produção Florestal**. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>> Acesso em: 15 de jun 2015.

SILVA, F. A. P. R. C.; ROBERT, R. C. G; SANTOS, A. S.; MENDONÇA, S. D. Quantificação e Avaliação das Principais Espécies Florestais Licenciadas no Estado do Acre de 2005 a 2012. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 4, p. 567-574, 2015.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, 2006.

SILVERSTEIN, R. M.; MORRILL, T. C. Espectrometria no infravermelho. Capítulo 3. In: **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 6ª edição. Rio de Janeiro, Edit. Guanabara Koogan S. A., 2000.

SOARES, A. C.; OLIVEIRA, R. M.; BRISOLARI, A.; SALES, A.; GONÇALVES, D. Molhabilidade em amostras de *Araucaria angustifolia* e *Pinus elliottii* após tratamento térmico e envelhecimento. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 447-456, 2011.

SOLOMONS, G.; FRYHLE, C. **Química orgânica**. 7ª ed. vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

STANGERLIN, D. M. ; COSTA, A. F. C. ; PASTORE, T. C. M.; MENEZZI, C. H. S. DEL; MELO, R. R.; GARLET, A. Molhabilidade da madeira de três espécies amazônicas submetidas a ensaios de apodrecimento acelerado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 266-272, 2013.

STUART, B. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. Analytical Techniques in the Science, 2004.

TELES, R. F.; COSTA, A. F.; SOUZA, M. R. Análise da influência do tratamento preservativo na cor e rugosidade de superfícies de madeiras tropicais. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 100-108, 2016.

THIBAUT, B.; DENAUD, L.; COLLET, R.; MARCHAL, R.; BEAUCHÊNE, J.; MOTHE, F.; MÉAUSOONE, P.; MARTIN, P.; LARRICQ, P.; EYMA, F. Wood machining with a focus on French research in the last 50 years. **Annals of Forest Science**, p. 35, 2015.

THOMA, H.; PERI, L.; LATO, E. Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 285-292, 2015.

TSHABALALA, M. A. **Surface characterization**. In ROWELL, R. M. (Ed.) Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2005.

UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R. E. Assessment of surface properties and solvent-borne coating performance of red oak wood produced by peripheral planning. **European Journal of Wood and Products** DOI 10.1007/s00107-016-1090-6.

VARELLA, C. A. A. **Análise de componentes principais**. Disponível em: <[http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/varella/ Downloads](http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads)>. 2008. Acesso em: 18 nov 2011.

WÄLINDER, M. **Wetting phenomena on wood – factors influencing measurements of wood wettability**. 2000. 70 f. Tese (Doutorado em Wood Technology and Processing) – KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm.

WANG, S.; ZHANG, Y.; XING, C. Effect of drying method on the surface wettability of wood strands. **Holz Roh Werkst**, v. 65, p. 437-442, 2007.

YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact angle and wetting properties. In: BRACCO, G.; HOLST, B. (Eds.) **Surface Science Techniques**. Springer Series in Surface Sciences, v. 51, p. 3-34, 2013.

ZENID, G. J. Madeiras e suas características. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Vitória: Aquarius, v. 1, p. 124-158, 2007.

ZHONG, Z. W.; HIZIROGLU, S.; CHAN, C. T. M. Measurement of the surface roughness of wood-based materials used in furniture manufacture. **Measurement**, v. 46, p. 1482-1487, 2013.

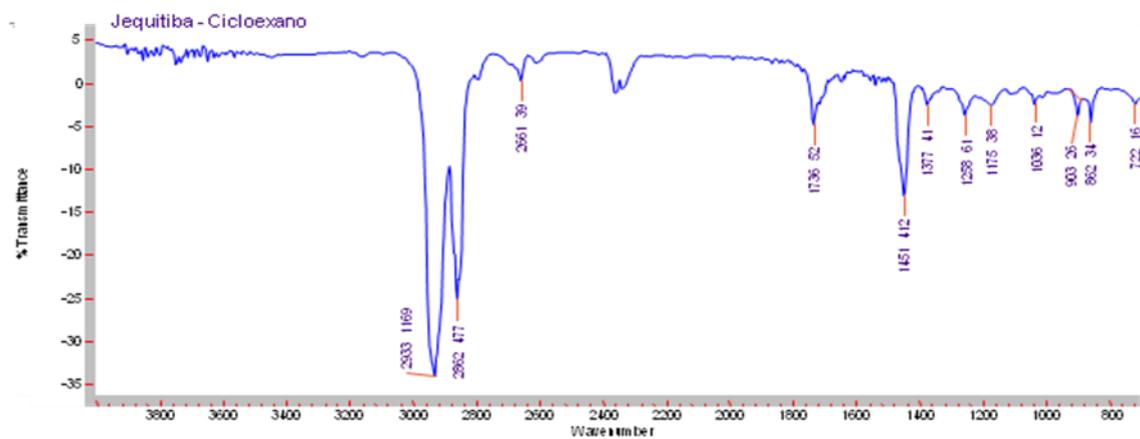
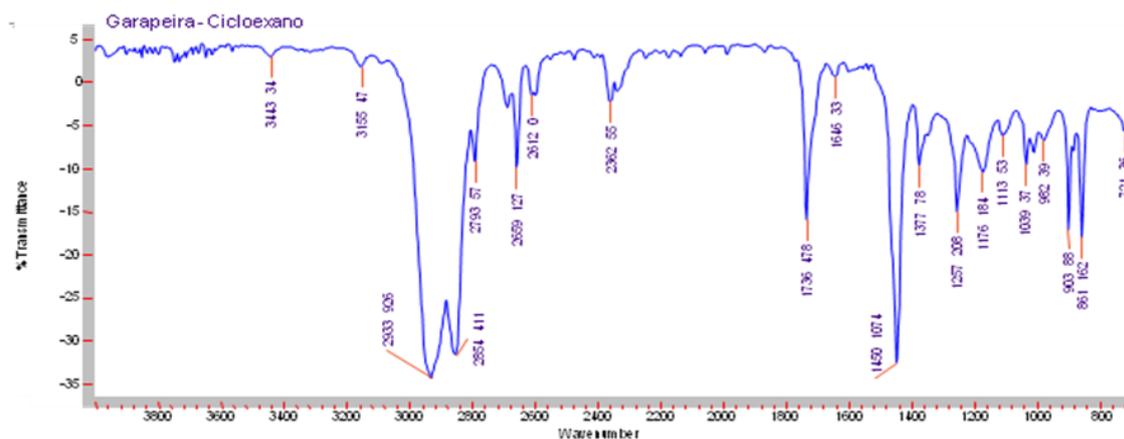
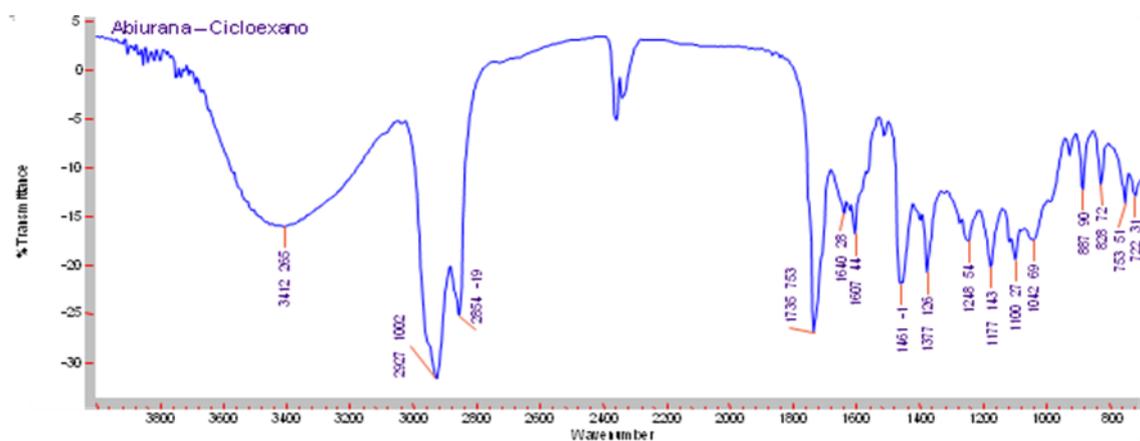
## APÊNDICES

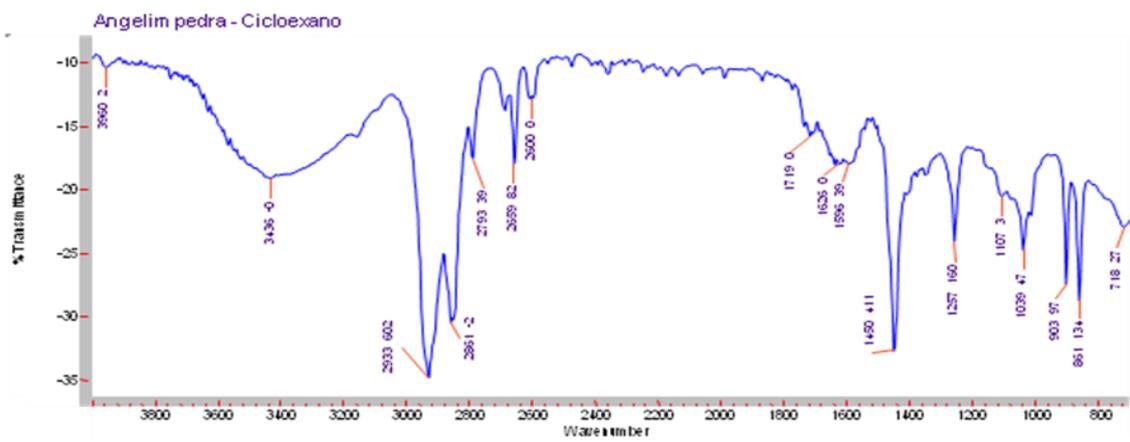
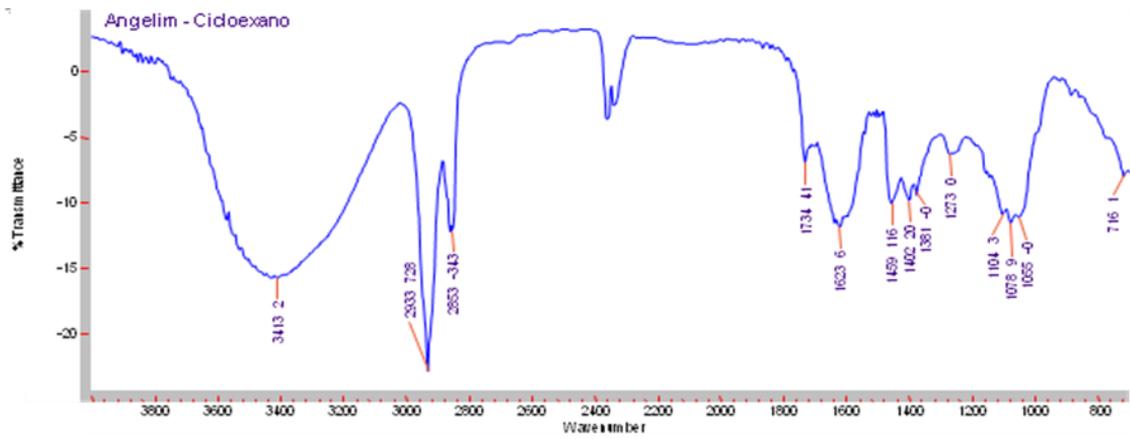
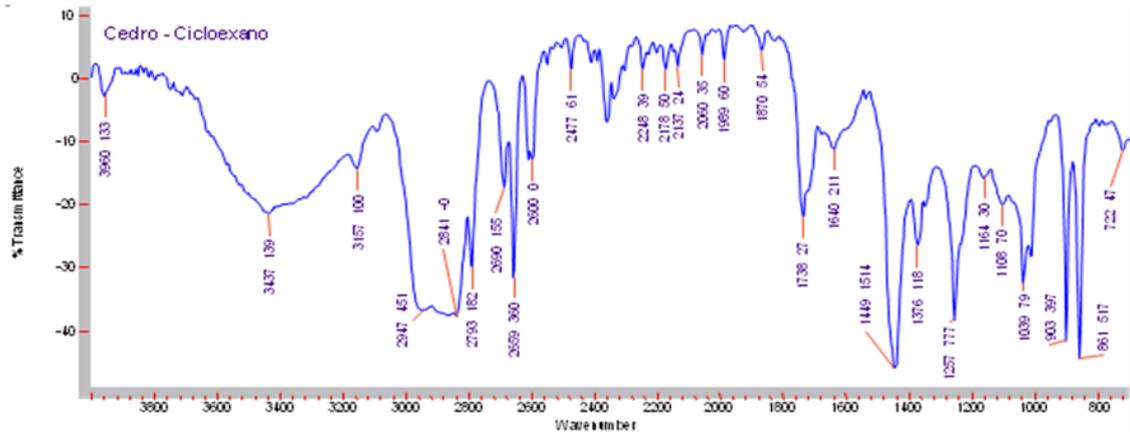
**Apêndice A.** Valores médios do teor de umidade e das variáveis colorimétricas do espaço de cor L\*a\*b\* CIE 1976 (L\* = luminosidade, a\* = tonalidade vermelho, b\* = tonalidade amarelo, C\*<sub>ab</sub> = croma e h<sub>ab</sub> = ângulo de tinta) das madeiras amazônicas.

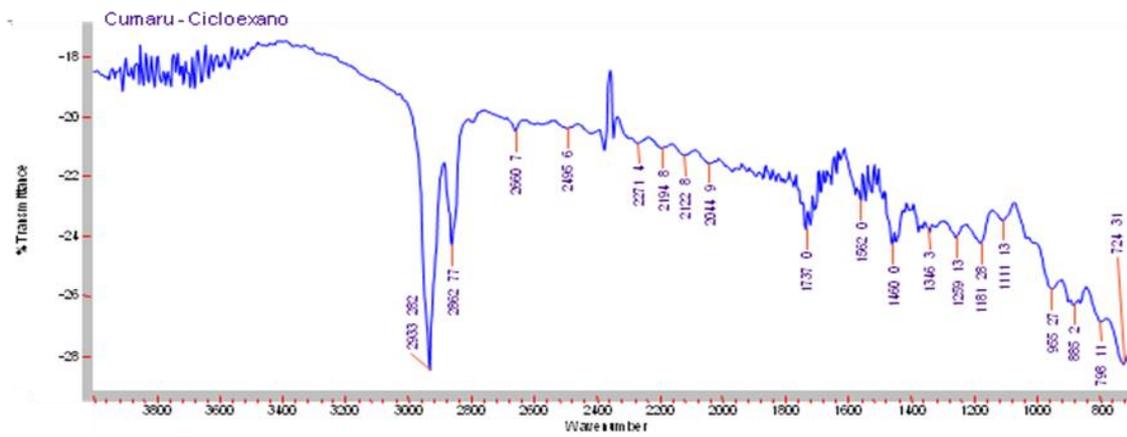
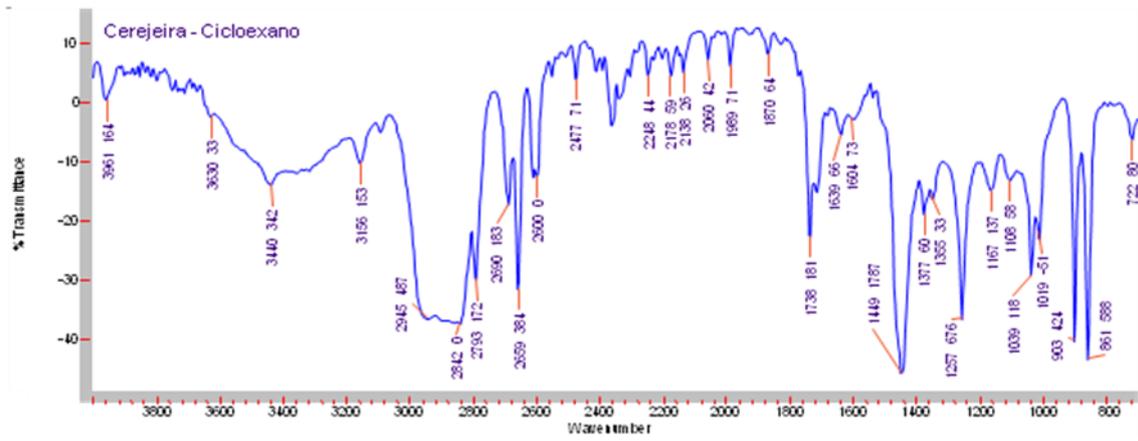
Espécie	Teor de umidade (%)	L*	a*	b*	C* <sub>ab</sub>	h <sub>ab</sub>	Classificação da cor <sup>1</sup>
<i>Amburana acreana</i> (cerejeira)	12,16 (11,58)	65,36 (4,11)	7,67 (11,91)	25,30 (5,78)	26,45 (5,82)	73,14 (2,29)	Oliva amarelado
<i>Apuleia molaris</i> (garapeira)	12,91 (7,42)	62,18 (2,88)	11,93 (6,43)	33,85 (4,58)	35,90 (4,48)	70,58 (1,45)	Amarelado
<i>Cariniana sp.</i> (jequitibá)	16,52 (12,43)	52,34 (5,25)	10,73 (8,02)	14,94 (8,49)	18,40 (7,71)	54,27 (3,57)	Marrom claro*
<i>Cedrela odorata</i> (cedro)	14,03 (17,96)	57,23 (4,69)	17,80 (6,05)	24,86 (4,14)	30,60 (3,66)	54,40 (3,47)	Rosa
<i>Dipteryx odorata</i> (cumaru)	10,36 (13,85)	48,61 (5,26)	10,27 (19,73)	15,00 (22,97)	18,21 (21,03)	55,24 (6,64)	Marrom escuro
<i>Hymenolobium excelsum</i> (angelim pedra)	10,75 (12,44)	52,56 (6,67)	13,95 (14,65)	23,89 (8,80)	27,72 (8,33)	59,76 (6,27)	Amarelo amorronzado
<i>Parkia pendula</i> (angelim)	12,27 (9,73)	53,71 (5,88)	10,97 (13,70)	21,80 (16,98)	24,44 (15,46)	62,98 (5,19)	Marrom claro
<i>Pouteria guianensis</i> (abiurana)	15,16 (10,72)	67,97 (3,28)	11,91 (6,63)	24,21 (4,38)	26,99 (4,22)	63,81 (2,25)	Marrom oliva

Valores entre parênteses = coeficiente de variação experimental. <sup>1</sup> Classificação de cor proposta por Camargos e Gonçalves (2001). \*Sem classificação. As análises de cor foram realizadas segundo a norma ISO 11664-4:2008 utilizando o espectrofotômetro CM 2600d da Konica Minolta [iluminante = D65, ângulo de observação = 10°, luz especular incluída e abertura = 3 mm (SAV «Small Area View»)].

**Apêndice B.** Espectro FT-IR dos extratos das madeiras amazônicas obtidos em solvente ciclohexano.







**Apêndice C.** Espectro FT-IR dos extratos das madeiras amazônicas obtidos em solvente acetato de etila.

