

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

TESE

**Efeito do envelhecimento e da rugosidade nas propriedades da
superfície e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto**

WANESSA APARECIDA SANTOS

2019



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

**EFEITO DO ENVELHECIMENTO E DA RUGOSIDADE NAS
PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE E NA ADERÊNCIA DO VERNIZ EM
MADEIRAS DE EUCALIPTO**

WANESSA APARECIDA SANTOS

Sob a orientação da Professora
Rosilei Aparecida Garcia

e

Coorientação do Professor
Roger E. Hernández

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.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2019

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

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

S231e Santos, Wanessa Aparecida, 1987-
Efeito do envelhecimento e da rugosidade nas propriedades da superfície e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto / Wanessa Aparecida Santos. - 2019.
125 f.: il.

Orientadora: Rosilei Aparecida Garcia.
Coorientador: Roger E. Hernández Peña.
Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, 2019.

1. ângulo de contato. 2. energia livre da superfície. 3. espaço de cor L*a*b* CIE 1976. 4. rugosidade 3D. 5. teste de pull-off. I. Garcia, Rosilei Aparecida, 1975-, orient. II. Peña, Roger E. Hernández, -, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. IV. Título.

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

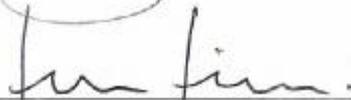
WANESSA APARECIDA SANTOS

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 em Produtos Florestais.

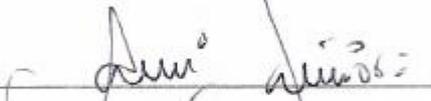
TESE APROVADA EM: 26/02/2019



Rosilei Aparecida Garcia, Prof.ª, Dr.ª, UFRRJ
(Orientadora)



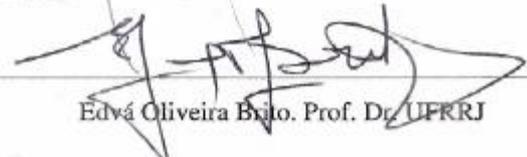
José Marcísio Lima, Prof. Dr. UFRA



Ananias Francisco Dias Jr., Prof. Dr. UFES



Alexandre Miguel do Nascimento, Prof. Dr. UFRRJ



Edvã Oliveira Brito, Prof. Dr. UFRRJ

*A Deus, pelo sustento imensurável na minha vida,
e à minha família
por toda ajuda e dedicação
durante todos estes anos.*

DEDICO

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), por me proporcionar tantos ensinamentos e bons momentos de alegria e felicidades e pelos amigos que aqui encontrei, os quais jamais me esquecerei nestes 12 anos de caminhada.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF) pela oportunidade deste aprendizado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) pela concessão da bolsa para a realização de estágio de pesquisa no Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMR) da Université Laval, Québec, Canadá por onde estive por 8 meses.

À Université Laval e ao CRMR, pela oportunidade de realização de parte da minha pesquisa de doutorado.

À minha orientadora Rosilei A. Garcia pela orientação, paciência durante todos esses anos desde a graduação até o doutorado, um exemplo de profissional, ao qual levo por toda minha vida, enfim, por toda atenção, dedicação, credibilidade e amizade, muito obrigada!

Ao meu coorientador Professor Roger E. Hernández pela oportunidade de trabalho, por toda hospitalidade, orientação, dedicação e ensinamentos.

Ao professor Heber dos Santos Abreu (*in memoriam*), seus ensinamentos estarão para sempre em meu coração, obrigada por me mostrar no doutorado a forma mais simples de rever o mundo através da química da madeira.

Ao professor Juarez Benigno Paes por fornecer o material de estudo.

Ao professor José Tarcísio Lima, com quem tive a honra e o prazer de sermos colegas de laboratório durante minha estadia no Canadá. Jamais esquecerei do “Zé Gotinha”, meu eterno companheiro de análise. Obrigada pelo carinho, pela sua companhia, pelos passeios pela universidade, pelos cafés, pelo grande ensinamento pessoal e profissional ao qual carregarei para o resto de minha vida. Minha eterna gratidão!

Aos técnicos Luc Germain e Daniel Bourgault, pela paciência e dedicação à minha pesquisa, sempre preocupados com a melhor forma de execução das minhas análises. Meu muito obrigado pela tentativa de falar português mesmo que fosse apenas um “Bom dia! Tudo bem?”. A coordenadora de pesquisa Claudia Cáceres Cuadros, por toda ajuda hospitalidade, amizade, paciência e orientação, e por muitos momentos de alegria vividos em nossas confraternizações.

Aos queridos professores Alexandre Miguel, Gilmara e Náタリア, pelas boas conversas e risadas nas horas dos almoços, por todo o carinho e amizade.

Ao técnico do laboratório de Química da Madeira, José Carlos pela amizade, carinho e confiança durante todos estes anos.

Aos meus amados pais Valdivio e Solange, por todo apoio, dedicação e esforço feito durante toda a minha vida. Ao meu irmão Wellington, por me apoiar sempre e acreditar em mim em todos os momentos desta caminhada.

Ao meu querido amor João Pedro, pela paciência, dedicação, por está sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis e olha que não foram poucos. Sou grata por cada gesto de carinho, sorriso e apoio.

À minha amiga Raquel Almeida, por todos os momentos maravilhosos que vivi em Québec, pela companhia, carinho e apoio. Minha eterna gratidão.

A baina mais brava, mas com o coração do tamanho do mundo que já conheci minha amiga Fernanda Morbeck, obrigada pelo carinho, companheirismo e amizade.

Aos meus amigos que sempre estão comigo desde a graduação, Carlos Henrique, Dally, Letícia, Polly e Nicelle, pela eterna amizade.

Aos meus amigos do CRMR, Bruna Ugulino, Jedi Rosero-Alvarado, Marie Joel, Mariana Hassegawa, Cleide Bourscheid, Carolina Espinoza Sanhueza e Júlio Bermudes, pelo carinho, amizade e por tonar nossos almoços sempre divertidos.

Á todos aqueles que contribuíram para realização deste trabalho e que me apoiaram em todos os momentos desta importante etapa em minha vida.

RESUMO GERAL

SANTOS, Wanessa Aparecida. **Efeito do envelhecimento e da rugosidade nas propriedades da superfície e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto**. 2019. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o efeito do envelhecimento e da rugosidade superficial na molhabilidade, na energia superficial e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto. Os objetivos específicos foram: (1) avaliar o efeito do tempo de envelhecimento na alteração da cor e na inativação da superfície e suas correlações; (2) avaliar o efeito do tempo de envelhecimento da superfície após usinagem no desempenho do verniz e sua correlação com a molhabilidade; e (3) avaliar o efeito das operações de usinagem (lixamento e aplainamento) na rugosidade 3D, na molhabilidade, na energia superficial e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto. Para atender esses objetivos, a tese foi dividida em três capítulos. No primeiro capítulo, foram realizadas medições de cor e ângulo de contato para sete espécies de eucalipto (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*) na superfície fresca (recém-usinada) e envelhecida após 7, 14, 21 e 28 dias. As análises colorimétricas foram realizadas no espaço de cor $L^*a^*b^*$ CIE 1976 e o ângulo de contato determinado pelo analisador de formato da gota DSA 100 no modo estático. No segundo capítulo, foram estudadas as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*. Análises de ângulo de contato e testes de adesão de um verniz à base de água foram realizados na superfície fresca (recém-usinada) e envelhecida após 4, 8, 24 e 48 h de aplainamento. No terceiro capítulo, foram avaliados os parâmetros de rugosidade 3D, a molhabilidade, a energia superficial e a adesão do verniz nas superfícies lixadas e aplainadas das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*. A rugosidade foi avaliada pelo método 3D com o rugosímetro óptico de luz branca MicroMeasure CHR 150. O ângulo de contato e a energia superficial foram determinadas pelo goniômetro de imagem FTÅ D200. A energia superficial foi calculada pela teoria ácido-base de Lifshitz-van der Waals/Lewis utilizando três diferentes líquidos: água destilada, formamida e diiodometano. A adesão do revestimento (verniz à base de água) na madeira foi determinada pelo teste de resistência a tração (*pull-off*). Os resultados do primeiro capítulo permitiram classificar as madeiras em três classes de densidade: muito alta, alta e baixa; e dois grupos de cor: amareladas e avermelhadas. O armazenamento das madeiras de eucalipto causou o escurecimento (menor luminosidade – L^*) e o aumento de cromaticidade na superfície. O tempo de acondicionamento aumentou o ângulo de contato indicando que as superfícies tornaram-se mais hidrofóbicas. As variáveis L^* , a^* , b^* e C^*_{ab} tiveram maior impacto na molhabilidade da superfície que a densidade. Os resultados do segundo capítulo mostraram redução na molhabilidade da superfície e perda de adesão com o aumento do tempo de envelhecimento. A perda de adesão ocorreu, geralmente, logo após as 4 h do aplainamento; entretanto, um efeito mais importante foi observado após 48 h. Os resultados também mostram que em algumas espécies de eucalipto, a perda de adesão é mais rápida que em outras. Nenhuma correlação foi encontrada entre a molhabilidade da superfície e a adesão do verniz nas madeiras de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*; entretanto, a resistência à tração da madeira de *Corymbia citriodora* diminuiu com o aumento do ângulo de contato médio, mostrando uma correlação significativa. Os resultados do terceiro capítulo mostraram que o aplainamento aumentou a rugosidade superficial mostrando maiores valores para os parâmetros de amplitude (S_a , S_q , S_v e S_z) que o lixamento. As superfícies lixadas apresentaram maior molhabilidade e energia superficial, entretanto, esta operação de usinagem não favoreceu

a penetração do verniz. As superfícies aplainadas de *Eucalyptus grandis* apresentaram uma melhor adesão do revestimento que as superfícies lixadas. As superfícies mais rugosas apresentaram menor molhabilidade, menor energia superficial e maior adesão do revestimento, portanto, a rugosidade apresenta um impacto mais importante na aderência do verniz à base de água que as propriedades de molhabilidade e energia superficial.

Palavras-chave: ângulo de contato, energia livre da superfície, espaço de cor L*a*b* CIE 1976, rugosidade 3D, teste de *pull-off*, usinagem.

GENERAL ABSTRACT

SANTOS, Wanessa Aparecida. **Effects of aging and roughness on the surface properties and adhesion of a water-borne varnish on eucalypt woods.** 2019. 122 p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forest Sciences). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

The general objective of this study was to evaluate the effects of aging and surface roughness on wettability, surface energy and adhesion of a water-borne varnish on eucalypt woods. The specific objectives were: (1) to evaluate the effect of aging time on color change and surface inactivation and its correlations; (2) to evaluate the effect of the aging time of the surface after machining on the performance of a water-borne varnish and its correlation with wettability; and (3) to evaluate the effect of machining process (sanding and planing) on 3D roughness, wettability, surface energy, and adhesion of a water-borne varnish on eucalyptus woods. To meet these objectives, the thesis was divided into three chapters. In the first chapter, color and contact angle measurements were performed for seven eucalypt species (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*) on the fresh surface (freshly machined) and aged after 7, 14, 21 and 28 days. The colorimetric analyzes were performed in the CIE 1976 L*a*b* color space and contact angle determined by a DSA 100 drop shape analyzer in static mode. In the second chapter, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, and *Eucalyptus pellita* woods were studied. Contact angle analysis and adhesion tests of a water-borne varnish were performed on the fresh surface (freshly machined) and aged surfaces after 4, 8, 24 and 48 h of planing. In the third chapter, 3D roughness parameters, wettability, surface energy and varnish adhesion on the sanded and planed surfaces of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus robusta* woods were evaluated. The roughness was evaluated by 3D method using a MicroMeasure CHR 150 optic white light roughness meter. The wettability and surface energy were determined by contact angle analysis performed with FTÅ D200 goniometer. The surface energy was calculated by the Lifshitz-van der Waals/ Lewis acid-base theory using three different liquids: distilled water, formamide, and diiodomethane. The adhesion of a water-borne varnish to the wood was determined by the tensile strength test (pull-off). The results of the first chapter permitted to classify woods into three density classes: very high, high, and low; and two color groups: yellowish and reddish. The storage of the eucalypt woods caused darkening (lower luminosity - L*) and increased chromaticity on the surface. The storage time increased the contact angle, resulting in surfaces more hydrophobic. The variables L*, a*, b* and C*_{ab} had a greater impact on the wettability of the surface than the density. The results of the second chapter showed a decrease in surface wettability and loss of coating adhesion with increasing aging time. Loss of adhesion usually occurs shortly after 4 h of planing, however, a more important effect is observed after 48 h. Also, the results show that in some eucalypt species, loss of adhesion is faster than in others. No correlation was found between surface wettability and varnish adhesion on *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus pellita* woods. However, in *Corymbia citriodora* wood, the tensile strength decreased with increasing mean contact angle, showing a significant correlation. The results of the third chapter showed that the planing increased the surface roughness showing higher values for the amplitude parameters (S_a, S_q, S_v, and S_z) than sanding. The sanded surfaces presented greater wettability and surface energy, however, this machining operation did not favor the penetration of the varnish. The planed surfaces of *Eucalyptus grandis* showed better adhesion of the coating than sanded surfaces. The rougher surfaces presented lower wettability and surface energy and higher

adhesion of the coating, therefore, the roughness has a more important impact on the adhesion of the water-borne varnish to eucalypt woods than the wettability and surface energy properties.

Keywords: contact angle, free surface energy, CIE 1976 L*a*b* space color, 3D roughness, pull-off test, machining.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos para calcular a energia livre da superfície (KRÜSS, 2011).....	18
Tabela 2. Parâmetros da energia livre da superfície para algumas espécies de madeira (GARDNER, 1995; CSANÁDY et al., 2015).....	18
Tabela 3. Vantagens e desvantagens do parâmetro de rugosidade R_a (SECCO et al., 2007)...	22
Tabela 4. Comparativo entre os produtos convencionais e o verniz à base de água (FAZANO, 1989).....	34
Tabela 5. Médias de densidade aparente e das variáveis colorimétricas das madeiras de eucalipto.....	45
Tabela 6. Análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de H – Kruskal-Wallis) para avaliar o efeito do tempo de envelhecimento nas variáveis colorimétricas das madeiras de eucalipto.....	47
Tabela 7. Resultado das análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de H – Kruskal-Wallis) para avaliar o efeito do tempo de envelhecimento na inativação da superfície de madeiras de eucalipto.....	51
Tabela 8. Médias e desvio padrão dos ângulos de contato da superfície das madeiras de eucalipto.....	55
Tabela 9. Correlação entre densidade, variáveis colorimétricas e ângulo de contato das madeiras de eucalipto.....	58
Tabela 10. Análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de H – Kruskal-Wallis) para avaliar o efeito do tempo de acondicionamento após o aplainamento na molhabilidade e na adesão das madeiras de eucalipto.....	74
Tabela 11. Médias de resistência à tração (<i>pull-off</i>) e perda de adesão em madeiras de eucalipto após o envelhecimento.....	77
Tabela 12. Correlações de Pearson entre a resistência à tração (<i>pull-off</i>) e a molhabilidade da superfície das madeiras de eucalipto.....	78
Tabela 13. Resultados das análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de Z – Wilcoxon-Mann-Whitney) visando comparar o efeito dos processos de usinagem (lixamento x aplainamento) nos parâmetros de rugosidade 3D das madeiras de eucalipto.....	92
Tabela 14. Média dos parâmetros de rugosidade superficial 3D das madeiras de eucalipto em função do processo de usinagem.....	92

Tabela 15. Resultados das análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de Z – Wilcoxon-Mann-Whitney) visando comparar o efeito dos processos de usinagem (lixamento x aplainamento) nas componentes de energia superficial das madeiras de eucalipto.....	98
Tabela 16. Médias da energia superficial em função do preparo da superfície para as madeiras de eucalipto.....	98
Tabela 17. Médias da resistência à tração (<i>pull-off</i>) e dos postos Kruskal Wallis em função do preparo da superfície após envernizamento para as madeiras de eucalipto.....	99
Tabela 18. Correlação entre os parâmetros de rugosidade 3D, energia superficial, molhabilidade e resistência à tração das madeiras de eucalipto.....	101

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Principais tipos de cortes ortogonais (HOADLEY, 2000).....7
- Figura 2.** Tipos de cavacos obtidos pelo corte na direção $90^\circ - 0^\circ$. (A) Cavacos do tipo I. (B) Cavacos do tipo II. (C) Cavacos do tipo III (WOODSON; KOCH, 1970).....7
- Figura 3.** Esquema do corte periférico, onde: α = ângulo de ataque, β = ângulo da ferramenta, γ = ângulo de folga, h = altura da onda de usinagem, F_h = largura da onda de usinagem, F = velocidade de alimentação da peça de madeira e R = raio do cilindro de corte (WENGERT, 1988).....9
- Figura 4.** Ângulo de corte e componentes das forças, onde, onde R = força resultante, F_N = força normal, F_P = força paralela, e = espessura do corte, α = ângulo de ataque, β = ângulo da ferramenta e γ = ângulo de folga (KOCH, 1985).....10
- Figura 5.** Valores normativos de um aplainamento, onde: f_z = avanço por dente ou onda de usinagem, t = profundidade do arco ciclóide ou altura da onda de usinagem, V_c = velocidade de corte das facas e V_f = velocidade de avanço da peça de madeira (WEISSENSTEIN, 2000).....12
- Figura 6.** Diferentes comportamentos de molhabilidade na superfície de uma lâmina de madeira: (A) não molhada, (B) parcialmente molhada e (C) molhada (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).....15
- Figura 7.** Esquema ilustrativo da medição do ângulo de contato (θ), onde: γ_{SV} = tensão interfacial sólida/vapor, γ_{LV} = tensão interfacial líquido/vapor e γ_{SL} = tensão interfacial sólido/líquido (mJ.m^{-2}) (WÅLINDER, 2000).....16
- Figura 8.** (A) Representação 2D do perfil de rugosidade de uma superfície (OLIVEIRA, 2004). (B) Imagem topográfica 3D da área de uma superfície obtida pelo rugosímetro óptico de luz branca MicroMeasure CHR 150.....20
- Figura 9.** Derivação matemática para o cálculo da rugosidade média (R_a) (HOBSON, 2014).....22
- Figura 10.** Análise gráfica dos parâmetros R_p e R_v , onde: A = área entre os pontos C e D e B = área entre os pontos E e F (HOBSON, 2014).....23
- Figura 11.** Análise gráfica do parâmetro R_z , onde: S = área dos elementos do perfil (picos e vales), P = picos, V = vales e S_n = área média dos elementos do perfil (picos e vales) (HOBSON, 2014).....23
- Figura 12.** Análise gráfica do parâmetro R_t , onde: l = comprimento de medição e ln = comprimento de amostragem (*cut-off*) (HOBSON, 2014).....23
- Figura 13.** Representação gráfica do parâmetro S_a de uma superfície (ISO 25178-2012).....25

Figura 14. Valores de S_{Sk} para diferentes perfis de rugosidade (ISO 25178-2012).....	25
Figura 15. Valores de S_{ku} para diferentes perfis de rugosidade (ISO 25178-2012).....	26
Figura 16. Procedimento para calcular S_{al} e S_{lr} . (A) Função de autocorrelação da superfície. (B) Autocorrelação de limite em s (Os pontos pretos estão acima do limite). (C) Limite do limiar central. (D) Coordenadas polares que levam aos comprimentos de autocorrelação em diferentes direções, onde R_{max} = Rugosidade máxima, R_{min} = Rugosidade mínima e t_y e t_x = distancia horizontal (ISO 25178-2012).....	27
Figura 17. Definição dos parametros funcionais S_k , S_{pk} e S_{vk} , onde: S_{mr1} e S_{mr2} = proporções materiais (ISO 25178-2012).....	28
Figura 18. Aspecto visual das madeiras de eucalipto. (A) <i>Corymbia citriodora</i> . (B) <i>Eucalyptus camaldulensis</i> . (C) <i>Eucalyptus pellita</i> . (D) <i>Eucalyptus robusta</i> . (E) <i>Eucalyptus saligna</i> . (F) <i>Eucalyptus urophylla</i> . (G) <i>Eucalyptus grandis</i>	41
Figura 19. (A) Croma e luminosidade. (B) Diagrama de cromaticidade a^* , b^* . (C) Parte do diagrama de cromaticidade (KONICA MINOLTA, 1998).....	42
Figura 20. (A) Aspecto geral do sistema de análise de formato da gota DSA 100 (KRÜSS GmbH, Hamburg, Alemanha) utilizado para as medições de ângulo de contato. (B) Mesa suporte com amostra de eucalipto.....	43
Figura 21. Efeito do tempo de envelhecimento na luminosidade (L^*) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	47
Figura 22. Efeito do tempo de envelhecimento na tonalidade vermelha (a^*) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	48
Figura 23. Efeito do tempo de envelhecimento na tonalidade amarela (b^*) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	48
Figura 24. Efeito do tempo de envelhecimento no cromia (C^*_{ab}) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	49
Figura 25. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de tonalidade (h_{ab}) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	50
Figura 26. Efeito do tempo de envelhecimento na diferença de cor (ΔE^*_{ab}) da superfície das madeiras de eucalipto. Linhas pontilhadas representam as classes de percepção da alteração da cor: valores entre 1,5 e 3,0 = notável e $> 3,0$ = apreciável (HIKITA et al., 2001). Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	50

Figura 27. Comportamento do ângulo de contato da superfície das madeiras de eucalipto em função do tempo de medição.....	54
Figura 28. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de contato inicial da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	56
Figura 29. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de contato final da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	56
Figura 30. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de contato médio da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	57
Figura 31. Correlação entre a densidade aparente (12% U) e a tonalidade vermelha (a*) das madeiras de eucalipto.....	58
Figura 32. Cálculo do ângulo de contato médio (média dos ângulos de contato formados nos lados direito e esquerdo) para diferentes formatos de gota (MÁXIMO et al., 2016).....	70
Figura 33. Aspecto visual das madeiras após o envernizamento nas superfícies fresca e envelhecida após 4, 8, 24 e 48 h do aplainamento. (A) <i>Corymbia citriodora</i> . (B) <i>Eucalyptus camaldulensis</i> . (C) <i>Eucalyptus pellita</i>	71
Figura 34. Suporte com inclinação de 45° utilizado para o acondicionamento das amostras de madeira, antes e após a aplicação do verniz.....	72
Figura 35. Ensaios de resistência à tração (<i>pull-off</i>) do verniz aplicado na superfície das madeiras de eucalipto com a máquina de ensaios universal MTS QTest TM /5.....	72
Figura 36. Comportamento do ângulo de contato na superfície das madeiras de eucalipto em função do tempo de medição para diferentes condições da superfície (fresca e envelhecida).....	75
Figura 37. Efeito do envelhecimento após o aplainamento no ângulo de contato médio da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	76
Figura 38. Efeito do envelhecimento após o aplainamento na resistência à tração (<i>pull-off</i>) na superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.....	78
Figura 39. Dimensionamento de amostras pareadas de eucalipto para diferentes processos de usinagem.....	87

Figura 40. Etapas para as medições de rugosidade 3D na superfície das madeiras de eucalipto com o rugosímetro óptico de luz branca MicroMeasure CHR 150.....	88
Figura 41. Aspecto visual das superfícies envernizadas das madeiras de eucalipto. (A) Superfície aplainada de <i>Eucalyptus robusta</i> . (B) Superfície lixada de <i>Eucalyptus robusta</i> . (C) Superfície aplainada de <i>Eucalyptus grandis</i> . (D) Superfície lixada de <i>Eucalyptus grandis</i>	90
Figura 42. Mapa 3D da rugosidade superficial da madeira de <i>Eucalyptus robusta</i> para diferentes processos de usinagem.....	94
Figura 43. Mapa 3D da rugosidade superficial da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> para diferentes processos de usinagem.....	95
Figura 44. Perfil típico de rugosidade superficial 2D das madeiras de eucalipto para diferentes processos de usinagem.....	96
Figura 45. Comportamento do ângulo de contato nas superfícies lixadas e aplainadas das madeiras de eucalipto em função do tempo.....	97
Figura 46. Imagens 2D das superfícies lixadas das madeiras de eucalipto obtidas pelo software Mountain Map. (A) <i>Eucalyptus robusta</i> com presença de ranhuras típicas do processo de lixamento. (B) <i>Eucalyptus grandis</i> com presença de pó nos lúmens celulares e nas ranhuras (áreas esbranquiçadas).....	100
Figura 47. Imagens 2D das superfícies aplainadas das madeiras de eucalipto obtidas pelo software Mountain Map mostrando a ausência de ranhuras. (A) <i>Eucalyptus robusta</i> com presença de cavidades celulares e células abertas. (B) <i>Eucalyptus grandis</i> com cavidades celulares.....	100

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Espécies de eucalipto.....	4
2.2 Usinagem da madeira.....	5
2.2.1 Aplainamento.....	6
2.2.2 Lixamento.....	10
2.3 Qualidade da superfície usinada da madeira.....	12
2.3.1 Molhabilidade da superfície.....	14
2.3.1.1 Energia superficial.....	17
2.3.2 Rugosidade superficial.....	19
2.3.2.1 Parâmetros de rugosidade 2D.....	21
2.3.2.2 Parâmetros de rugosidade 3D.....	24
2.4 Envernizamento da madeira.....	28
2.4.1 Teoria da adesão das superfícies.....	28
2.4.2 Revestimentos de acabamento superficial da madeira.....	29
2.4.3 Principais componentes de tintas e vernizes.....	31
2.4.4 Vernizes.....	32
CAPÍTULO I.....	35
EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA ALTERAÇÃO DA COR E NA INATIVAÇÃO DA SUPERFÍCIE EM MADEIRAS DE EUCALIPTO.....	35
RESUMO.....	36
ABSTRACT.....	37
1 INTRODUÇÃO.....	38
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
2.1 Material.....	41
2.2 Espectroscopia da cor da madeira.....	41
2.3 Análises de ângulo de contato.....	43
2.4 Análises estatísticas.....	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
3.1 Caracterização física e colorimétrica da madeira.....	45
3.2 Efeito do tempo de envelhecimento na alteração da cor da madeira.....	46
3.3 Efeito do tempo de envelhecimento na inativação da superfície da madeira.....	51
3.4 Correlação entre densidade, cor e ângulo de contato.....	57
4 CONCLUSÕES.....	59
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
CAPÍTULO II.....	65
EFEITO DO ENVELHECIMENTO DA SUPERFÍCIE NA ADERÊNCIA DO VERNIZ EM MADEIRAS DE EUCALIPTO.....	65
RESUMO.....	66
ABSTRACT.....	67
1 INTRODUÇÃO.....	68
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	70
2.1 Preparo do material.....	70
2.2 Análises de molhabilidade.....	70
2.3 Aplicação do verniz.....	71
2.4 Teste de adesão do verniz.....	72

2.5 Análises estatísticas.....	73
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
3.1 Efeito do envelhecimento na molhabilidade da superfície da madeira.....	74
3.2 Efeito do envelhecimento na adesão da madeira.....	76
3.3 Correlação entre a adesão e a molhabilidade da superfície da madeira.....	78
4 CONCLUSÕES.....	79
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
CAPÍTULO III.....	82
EFEITO DA USINAGEM NA RUGOSIDADE 3D, NA MOLHABILIDADE, NA ENERGIA SUPERFICIAL, E NO DESEMPENHO DO VERNIZ EM MADEIRAS DE EUCALIPTO...	82
RESUMO.....	83
ABSTRACT.....	84
1 INTRODUÇÃO.....	85
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	87
2.1 Preparo do material.....	87
2.2 Processos de usinagem.....	87
2.3 Análise de rugosidade superficial 3D.....	88
2.4 Análises de molhabilidade e energia superficial.....	89
2.5 Aplicação do verniz.....	90
2.6 Teste de adesão do verniz.....	90
2.7 Análises estatísticas.....	91
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
3.1 Rugosidade superficial 3D.....	92
3.2 Molhabilidade e energia superficial.....	97
3.3 Adesão da madeira.....	99
3.4 Correlação entre rugosidade 3D, molhabilidade, energia superficial e adesão.....	101
4 CONCLUSÕES.....	102
5 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	103
CONCLUSÕES GERAIS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	109

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos houve um aumento no uso de espécies de eucalipto para a fabricação de produtos sólidos de madeira. Apesar disso, a utilização da madeira sólida de eucalipto no Brasil ainda é incipiente quando comparada a outros países como Austrália, África do Sul, Chile e Argentina, onde a sua utilização é comum para a produção de móveis (UNB/LPF, 2007).

No Brasil, há inúmeros estudos sobre o uso da madeira sólida de eucalipto, visando indentificar as espécies mais adequadas e com maior potencial para a produção de madeira sólida, por meio da determinação e conhecimento das suas características anatômicas, físicas, químicas e mecânicas (OLIVEIRA, 1997). Segundo Oliveira (1997), isso ocorre, em grande parte, devido à necessidade de se encontrar madeiras que substituam as espécies nativas, as quais muitas vezes apresentam restrições de exploração, escassez e custos elevados de transportes para os centros industriais e de consumo. De acordo com Silva et al. (2005, 2009), parte das dificuldades no uso das madeiras sólidas de eucalipto estão justamente na falta de conhecimento para se trabalhar corretamente com esse material.

As propriedades da superfície da madeira desempenham um papel importante quando o material é usado ou processado em produtos como madeira serrada, marcenaria, papel ou compostos à base de madeira. Essas propriedades afetam a qualidade e a durabilidade de adesivos e acabamentos superficiais (tintas, vernizes, seladores, lixamento, revestimentos com lâminas decorativas, resinas, papéis decorativos, etc) na madeira sólida e nos produtos reconstituídos à base de madeira (NCUBE; MEINCKEN, 2010; TSHABALALA, 2005). A demanda por produtos de alto padrão, bem acabados e duráveis torna importante a realização de estudos sobre as propriedades da superfície da madeira. Uma superfície bem acabada, por exemplo, agrega valor à peça, influenciando diretamente no preço e nos processos finais do produto.

As propriedades da superfície de madeira podem ser divididas em dois grupos: físicas e químicas. As propriedades físicas da superfície da madeira são influenciadas pela morfologia, rugosidade, lisura, área de superfície específica e permeabilidade, enquanto que as propriedades químicas incluem a composição elementar e molecular de grupos funcionais. Juntos, estes dois grandes grupos determinam as propriedades termodinâmicas da superfície da madeira (TSHABALALA, 2005), a qual, por sua vez, afeta o desempenho e a durabilidade dos adesivos e revestimentos. Os métodos para a caracterização das propriedades da superfície de madeira podem ser divididos em três categorias gerais: métodos microscópicos, espectroscópicos e termodinâmicos. Os métodos microscópicos permitem obter informações sobre a morfologia da superfície; os métodos espectroscópicos visam fornecer informações sobre a química da superfície enquanto os métodos termodinâmicos geram informações sobre a energia da superfície (ROWELL, 2005). As propriedades termodinâmicas da madeira (energia superficial e molhabilidade) são determinadas através de análises de ângulo de contato (TSHABALALA, 2005). O ângulo de contato é uma medição quantitativa da molhabilidade, ou seja, quanto menor o ângulo maior a molhabilidade e a energia superficial do material analisado e vice-versa. As superfícies com ângulo de contato de 0° (zero) apresentam uma molhabilidade completa enquanto que superfícies com ângulos de 180° são completamente hidrofóbicas.

A rugosidade superficial é uma das principais características físicas da superfície e é afetada pela estrutura anatômica e pelo preparo da superfície (usinagem) ou pela combinação de ambos, as quais são importantes para o desempenho do material. Entre os métodos mais

modernos para avaliar a morfologia da superfície, está a rugosidade 3D. O método 3D permite uma melhor visualização da superfície devido ao estudo ou descrição detalhada das características da superfície, apresentando, portanto uma maior estabilidade estatística devido a maior representatividade dos dados. Este método quando comparado ao método tradicional 2D possui ciclos mais longos de medição e maior arquivamento de dados. A rugosidade 3D pode ser medida de duas maneiras: por contato ou pela emissão de feixe de luz ou laser (HOBSON, 2014). Neste estudo, a rugosidade foi avaliada pelo método 3D com um rugosímetro óptico de luz branca.

As propriedades físico-químicas da superfície da madeira vão depender principalmente da espécie, da idade da árvore e do processamento mecânico submetido ao material. Dependendo da utilização final, a madeira precisa passar por tratamentos de melhoria da superfície para superar os problemas resultantes da inativação da superfície e formação de camadas com limites fracos ocasionados pela secagem, usinagem e envelhecimento (ROWELL, 2005).

A inativação da superfície da madeira ocorre em detrimento das propriedades da superfície como resultado de diferentes fatores. Estes fatores podem ser resumidos pela migração de extrativos hidrofóbicos para a superfície durante a secagem e/ou armazenamento, resultando em uma baixa molhabilidade; pelo aumento da acidez da superfície, a qual afeta diretamente a adesão; pela oxidação da superfície como resultado do envelhecimento; pela reorientação molecular dos grupos funcionais da superfície; e pelo fechamento dos microporos celulares, reduzindo a absorção na madeira (CHRISTIANSEN, 1990, 1991; ROWELL, 2005).

A formação de camadas com limites fracos na linha de cola é resultante de variações químicas e mecânicas que ocorrem nas superfícies da madeira. As variações químicas tal como já mencionado, ocorrem através da migração de extrativos na superfície; por exemplo, resina, gorduras, esteróis e ceras irão torná-la hidrofóbica, enquanto os açúcares, taninos, fenóis e proteínas irão torná-la hidrofílica (ROWELL, 2005). Já as variações mecânicas da superfície são resultantes da degradação ocasionada pela luz UV e pelos danos causados durante os processos de usinagem e secagem. De acordo com Nussbaum e Sterley (2002), quanto maior a quantidade de extrativos presentes na madeira e quanto mais longo for o tempo de armazenamento após o corte, menor será a molhabilidade da superfície, tornando-a desfavorável a adesão. Entretanto, o efeito desses fatores depende da espécie de madeira devido às suas características físicas e químicas, daí a importância de estudar diferentes espécies.

O uso de revestimentos de superfície da madeira visa proteger, melhorar a aparência, aumentar a resistência mecânica e valorizar o produto final. A compreensão dos mecanismos de adesão nas superfícies da madeira torna-se uma ferramenta essencial para ampliar a durabilidade do revestimento de verniz (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005). Sendo assim, análises de rugosidade e de molhabilidade fornecem informações importantes sobre a qualidade da superfície e sua relação com a adesão dos revestimentos. Uma boa molhabilidade é fundamental para uma boa aderência, pois levará a um melhor encaixe mecânico e maior interação entre a superfície da madeira e a película do filme formada pelo verniz. Um revestimento que apresenta cura antes da molhabilidade completa poderá formar uma película fraca e apresentar uma baixa adesão (NUSSBAUM; STERLEY, 2002; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005).

Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar o efeito do acondicionamento (envelhecimento) e da rugosidade superficial na molhabilidade, na energia superficial e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto.

A tese está dividida em três capítulos. No Capítulo I, intitulado “EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA ALTERAÇÃO DA COR E NA INATIVAÇÃO DA SUPERFÍCIE EM MADEIRAS DE EUCALIPTO”, foi avaliado o efeito do tempo de acondicionamento (envelhecimento) na alteração da cor e na inativação da superfície e suas correlações em sete madeiras de eucalipto (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*). Sendo assim, foram testadas as seguintes hipóteses: (i) o envelhecimento altera a cor e inativa a superfície da madeira de espécies de eucalipto; e (ii) há uma correlação entre a alteração de cor e a inativação da superfície, a qual é dependente da espécie. Os resultados parciais deste capítulo foram publicados no artigo intitulado “Efeito da densidade e da cor na molhabilidade da superfície de madeiras de eucalipto”, aceito para publicação na revista SCIENTIA FORESTALIS, Piracicaba, v. 47, n. 122, junho de 2019.

No Capítulo II, intitulado “EFEITO DO ENVELHECIMENTO DA SUPERFÍCIE NA ADERÊNCIA DO VERNIZ EM MADEIRAS DE EUCALIPTO”, foi avaliado o efeito do tempo transcorrido entre o processo de usinagem (aplainamento) e o envernizamento na resistência à tração (*pull-off*) do verniz assim como sua correlação com a molhabilidade da superfície para três espécies de madeira (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*). Portanto, foram testadas as seguintes hipóteses: (i) a molhabilidade da superfície da madeira é influenciada pelo tempo de envelhecimento e pelo preparo da superfície; (ii) o tempo de envelhecimento afeta a adesão do verniz; e (iii) há correlação entre a molhabilidade da superfície e a adesão do verniz ao longo do tempo de envelhecimento após o aplainamento.

No Capítulo III, intitulado “EFEITO DA USINAGEM NA RUGOSIDADE 3D, NA MOLHABILIDADE, NA ENERGIA SUPERFICIAL E NO DESEMPENHO DO VERNIZ EM MADEIRAS DE EUCALIPTO” foi avaliado o efeito das operações de usinagem (lixamento x aplainamento) nos parâmetros de rugosidade 3D, na molhabilidade, na energia superficial e na aderência do verniz em duas madeiras de eucalipto (*Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*) e suas correlações, sendo testadas as seguintes hipóteses: (i) as operações de usinagem alteram a superfície das madeiras de eucalipto, a rugosidade, a molhabilidade e a energia superficial; (ii) a molhabilidade e a energia superficial da madeira dependem da rugosidade superficial; e (iii) há correlação entre a rugosidade, a molhabilidade, a energia superficial e a resistência à tração (*pull-off*) do verniz.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Espécies de eucalipto

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Mirtaceae e apresenta de 600 à 700 espécies e sub-espécies (SBS, 2006). O gênero é dividido em oito subgêneros: *Blakella*, *Eudesmia*, *Gaubaea*, *Idiogenes*, *Telocalyptus*, *Monocalyptus*, *Symphyomyrtus* e *Corymbia* (hoje considerado gênero). As espécies de eucalipto ocorrem naturalmente na Austrália, exceto pelas espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus deglupta* que ocorrem em ilhas da Oceania (AGOSTINETTO et al., 2011).

A maioria das espécies de eucalipto são conhecidas como árvores típicas de florestas altas, atingindo alturas que variam de 30 a 50 m e de florestas abertas, com árvores menores, atingindo alturas entre 10 e 25 m (MORA et al., 2000). Sua copa geralmente é rala e alongada e o tronco quase sempre retilíneo e cilíndrico, com casca ou muito lisa ou muito áspera e fissurada dependendo da espécie. As folhas possuem a característica comum entre a maioria das espécies, de serem aromáticas e dispostas nos ramos de maneira oposta na parte inferior e, alternas na parte superior (BERTOLA, 2013).

Dentre as inúmeras espécies arbóreas existentes, o eucalipto, devido ao seu rápido crescimento, produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade de adaptação e por ter aplicações para diferentes finalidades tem sido extensivamente utilizado em plantios florestais. Dentre as espécies de eucalipto mais utilizadas nos plantios florestais estão o *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus citriodora* (atual *Corymbia citriodora*), *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunni* e alguns híbridos. Nas plantações de eucalipto, o corte para industrialização ocorre normalmente aos cinco anos de idade, em regime que permitirá até rotações sucessivas e econômicas, com ciclo de até 20 anos (MORA et al., 2000).

O eucalipto pode ser destinado para diversos fins tais como papel e celulose, lenha, carvão, aglomerado, serraria, óleos para indústrias farmacêuticas (no caso da espécie de *Corymbia citriodora*), mel, ornamentação, quebra-vento, entre outros. Além dos usos tradicionais, há uma forte tendência na utilização de madeiras fabricação de casas, móveis e estruturas, principalmente nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil pela falta de madeiras nativas (ZENID, 2009; DRUMOND; OLIVEIRA, 2006).

A introdução do gênero *Eucalyptus* no Brasil aconteceu no princípio do século XIX, com evidências de que as primeiras árvores teriam sido plantadas em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro (PEREIRA et al., 2000). Até então, o eucalipto foi plantado com a finalidade de ornamentação ou para servir de quebra-ventos devido ao seu extraordinário desenvolvimento. O responsável pela introdução de plantações econômicas no Brasil foi o silvicultor Edmundo Navarro de Andrade, considerado o pai da eucaliptocultura, depois de estudar várias espécies nativas (ex.: peroba, cabreúva, jequitibá, jacarandá-paulista, pinheiro-do-paraná e cedro) e outras exóticas tal como o *Eucalyptus globulus*, implantado com sementes trazidas de Portugal (PEREIRA et al., 2000). Após ensaio desenvolvido entre 1904 e 1909 no Horto de Jundiá-SP, o eucalipto se destacou de tal forma que passou a suprir as necessidades de madeiras para lenha, postes e dormentes de estradas de ferro, as quais começavam a ser construídas na Região Sudeste. Foi somente na década de 1950 que o eucalipto mostrou-se como uma excelente fonte de matéria prima para a produção de celulose de fibra curta (PEREIRA et al., 2000; FLORESTAR, 2015).

A cultura do eucalipto se adaptou muito bem às condições edafoclimáticas do país, levando o Brasil a possuir a maior produtividade média e a maior produtividade potencial do mundo. O sucesso da espécie em território nacional é atribuída à três fatores:

- (1) escolha dessas espécies como solução nacional para a silvicultura, para a produção de imensas quantidades de madeiras e de seus subprodutos;
- (2) técnicas de clonagem, que consolidaram os trabalhos de melhoramento genético do eucalipto, levando ao incrível aumento da produtividade atual das florestas. Esse fator incentivou dezenas de milhares de pequenos e médios agricultores a plantarem eucalipto com mudas fornecidas pelas grandes empresas; e
- (3) desenvolvimento de pesquisas genéticas avançadas, a genômica e a biotecnologia, trabalho iniciado no Brasil pela iniciativa privada em consórcio com as universidades (FOELKEL, 2005).

O gênero *Eucalyptus* compreende um grande número de espécies, com madeiras de características físico-mecânicas e estéticas bastante diferenciadas, o que permite a substituição de várias espécies nativas. No entanto, poucas espécies têm sido plantadas em escala comercial (PEREIRA et al., 2000).

O uso da madeira de eucalipto pela indústria brasileira de móveis já apresenta um crescimento considerável no setor (FERREIRA et al., 2008). Os fatores que limitam o uso do eucalipto no setor moveleiro são a alta incidência de nós, rachaduras no desdobro primário e secagem, falta de retidão das toras, altos índices de variação dimensional linear e volumétrica, grande variabilidade tecnológica entre as espécies, resultando em dificuldades para a produção de móveis de qualidade (OLIVEIRA, 1997). Entretanto, o tratamento adequado da madeira mostra que vários desses problemas podem ser contornados com utilização correta de equipamentos e procedimentos, levando a esforços cada vez maiores no sentido de adequação de tecnologias de processamento da espécie.

A densidade da madeira pode variar com a idade da árvore, com o vigor da planta, com o local e a taxa de crescimento, e ainda variar no sentido base-topo e na distância medula-casca na mesma árvore (FERREIRA, 1972; SOUZA et al., 1979 *apud* TRUGILHO et al., 1996). A densidade básica da madeira de eucalipto, quando relacionada à variação longitudinal pode apresentar vários tipos de tendências. Em algumas espécies, a densidade tende a ser decrescente da base para o topo, em outras tende a ser crescente a partir do nível do diâmetro à altura do peito (DAP), podendo ainda, em outras espécies, apresentar valores alternados com a tendência decrescente e crescente (BARRICHELO et al., 1983; TRUGILHO et al., 1996). A variação da densidade básica no sentido medula-casca, geralmente é crescente, isto é, aumenta gradativamente do cerne para o alburno (FOELKEL et al., 1983; TRUGILHO et al., 1996).

2.2 Usinagem da madeira

A usinagem da madeira é o processo no qual a forma geométrica da peça é modificada através da remoção progressiva de cavacos os quais vão apresentar tamanhos e formas variadas. Esta operação abrange os processos primário e secundário (NÉRI et al., 1999). O processo primário é aquele no qual as toras são transformadas em tábuas, pranchões, caibros, entre outros enquanto o processo secundário consiste em retrabalhar as peças advindas do processamento primário através das operações de usinagem (aplainamento, lixamento, fresamento, furação, molduramento e torneamento) visando uma melhor qualidade da superfície (NÉRI et al., 1999). Algumas dessas operações podem ser realizadas no processamento primário e outras, principalmente, no processamento secundário da madeira. Estes tipos de cortes envolvem processos de tensão e ruptura e a força gerada é transmitida à madeira por uma ferramenta de corte. Esta ferramenta apresenta uma geometria definida, e sua direção de movimento determina como os esforços se produzem e como serão recebidos

pela madeira. As forças de corte estabelecidas têm grande relevância quanto ao projeto de geometria da ferramenta de corte e na potência requerida das máquinas que compõem uma serraria. As forças de corte podem variar de acordo com a espécie de madeira, a direção das fibras e de corte, a afiação da ferramenta e outras variáveis (NÉRI et al., 1999).

Na usinagem, procura-se obter superfícies de boa aparência, com qualidade para realizar operações de acabamento com aplicação de tintas e vernizes. Entretanto, os processos de usinagem ocasionam irregularidades aparentemente visíveis nas superfícies como marcas ou sulcos, devido à ferramenta de corte e abertura das cavidades das células formadoras do tecido lenhoso (PALERMO et al., 2015). O tamanho das cavidades pode estar relacionado a diversos fatores inerentes à madeira (dureza, abrasividade, orientação da grã, resistência mecânica, etc) e aos parâmetros de cortes (altura e profundidade de corte, espessura do cavaco, velocidade de corte e de alimentação, ângulo de ataque, ângulo de cunha, ângulo de incidência e afiação da ferramenta) (LUCAS FILHO, 2004; PALERMO et al., 2015).

Segundo Bonduelle (2002), a usinagem da madeira pode ser expressa pela função 5M:

- (1) matéria-prima – relacionada às propriedades intrínsecas da madeira e suas interações com o processo;
- (2) máquina – relacionada com os aspectos construtivos das máquinas incluindo os dispositivos de fixação, de condução e de exaustão de cavacos que visam melhorar a operação de usinagem;
- (3) metodologia – compreende toda a definição dos parâmetros de usinagem a serem utilizados, assim como a escolha das ferramentas mais adequadas visando otimizar o processamento;
- (4) mão de obra – considera o treinamento dos operadores executores das tarefas de usinagem, os quais devem ter conhecimentos de todos os itens anteriores para poder interferir, no tempo certo, caso perceba alguma deficiência no processo; e
- (5) meio ambiente – considera-se que todas as fases de processamento evitem degradações do ambiente visando o melhor aproveitamento da matéria prima e minimizando os resíduos e ruídos.

2.2.1 Aplainamento

O aplainamento é um dos processos de usinagem da madeira mais importantes e ocorre logo após a serragem da madeira. Este processo tem como objetivo tornar as superfícies mais lisas e eliminar defeitos na superfície produzidos pelas operações de usinagem anteriores (COOL, 2011; UGULINO, 2016). O aplainamento consiste na remoção de cavacos de tamanhos variados no preparo das superfícies (LUCAS FILHO, 2004; FONTE, 2016). A formação desses cavacos dependem da geometria da ferramenta, da umidade da madeira e do movimento da ferramenta em relação à orientação das fibras. Os cavacos gerados podem ser aproveitados na fabricação de laminados, painéis de partículas e/ou papel e celulose (NÉRI et al., 1999; COOL, 2011). Alguns autores afirmam que um aplainamento bem executado elimina a necessidade de lixamento (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a; SILVA, 2002; SILVA et al., 2009).

Existem dois tipos principais de cortes: o ortogonal e o periférico. O corte ortogonal ocorre pelo movimento perpendicular da aresta de corte de uma ferramenta em direção do movimento da peça usinada. A superfície resultante é um plano paralelo à superfície inicial. As principais máquinas de usinagem que utilizam o corte ortogonal são a serra de fita, serra circular, tornos e plainas (NÉRI et al., 1999). Para definir as diferentes situações que o corte ortogonal da madeira pode apresentar, Mackenzie (1960) propôs uma notação com dois

numerais, onde o primeiro número representa o ângulo entre o fio de corte da ferramenta e a fibra da madeira e o segundo indica o ângulo entre a direção de corte e a fibra da madeira. Esta notação define três cortes principais: $90^\circ - 0^\circ$, $0^\circ - 90^\circ$ e $90^\circ - 90^\circ$ (Figura 1).

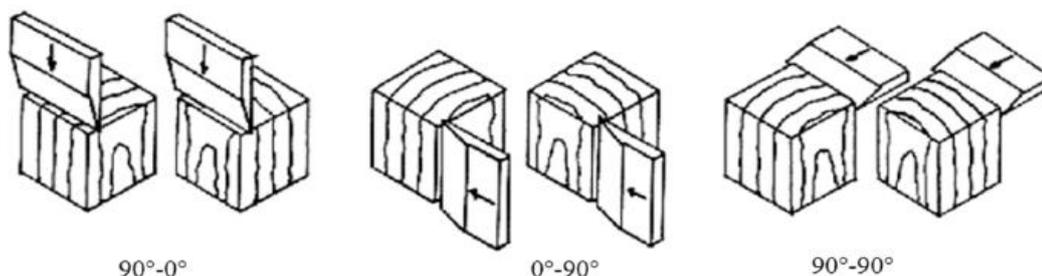


Figura 1. Principais tipos de cortes ortogonais (HOADLEY, 2000).

O corte do tipo $90^\circ - 0^\circ$ é encontrado em cortes realizados por plainas, desgrossadeiras e em cortes de tábuas, na direção paralela às fibras (direção longitudinal). De acordo com Néri et al. (1999), o aplainamento visando uniformizar as dimensões e melhorar a qualidade de corte, está relacionado com o tipo de cavaco formado. Segundo Franz (1958) e Néri et al. (1999), observa-se três tipos básicos de cavacos formados para o corte $90^\circ - 0^\circ$:

Tipo I: o cavaco é formado por fendilhamentos em um plano à frente da ferramenta de corte. Neste caso, a relação entre a resistência ao fendilhamento e a resistência à flexão da madeira condiciona o tamanho do cavaco (Figura 2A). O uso de um elevado ângulo de ataque (α) maior que 25° , bem como uma alta espessura do cavaco e um baixo teor de umidade da madeira, favorecem para a produção deste tipo de cavaco. A produção deste cavaco está ligada ao baixo consumo de energia da máquina-ferramenta.

Tipo II: o cavaco é formado pela ruptura da madeira que se produz ao longo de uma linha estendendo-se a partir da aresta de corte da ferramenta (Figura 2B). Esta ruptura ocorre por cisalhamento diagonal e forma um cavaco contínuo, esta formação permite limitar o aparecimento de defeitos na superfície. Dentre os principais fatores que permitem a formação do cavaco do tipo II estão o uso de ângulo de ataque (α) intermediário (entre 10° e 25°) e baixa espessura do corte.

Tipo III: o cavaco é formado a partir das forças de corte que geram uma ruptura por compressão paralela e cisalhamento longitudinal, diante da aresta da ferramenta de corte (Figura 2C). Como resultado, o cavaco não tem forma definida, o qual é reduzido à pequenos pedaços. Este cavaco ocasiona defeitos tal como fibras levantadas. Ângulos de ataque pequenos ou negativos e o uso de ferramentas de corte sem corte levam a formação deste tipo de cavaco.

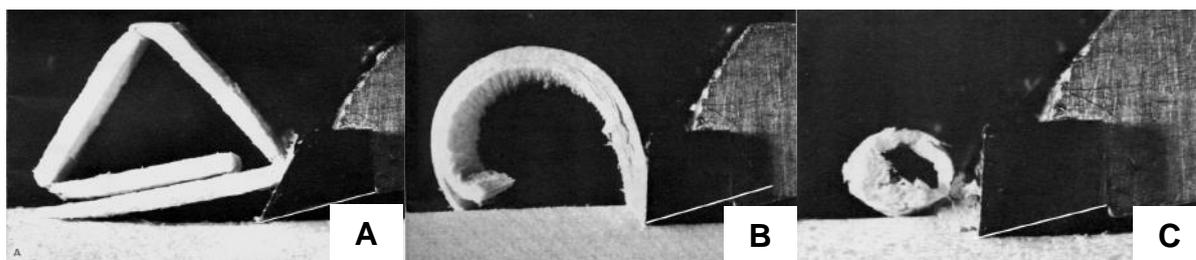


Figura 2. Tipos de cavacos obtidos pelo corte na direção $90^\circ - 0^\circ$. (A) Cavacos do tipo I. (B) Cavacos do tipo II. (C) Cavacos do tipo III (WOODSON; KOCH, 1970).

O corte 0° - 90° ocorre no processo de laminação por torneamento ou fatiamento. Este tipo de corte apresenta força de corte menor quando comparados aos demais cortes. A produção de cavacos para este corte acontece por dois tipos: o tipo A que é semelhante ao cavaco do Tipo I do corte 90° - 0° , sendo caracterizado por fissuras ou fendilhamentos à frente da ferramenta de corte e o tipo B sendo semelhante ao cavaco Tipo III, produzindo compressão das fibras à frente da ferramenta de corte (STEWART, 1979; KOCH, 1985).

O corte tipo 90° - 90° é típico da serra fita de corte longitudinal (KOCH, 1985). Neste corte, a aresta de corte da ferramenta, assim como a direção do corte são orientadas perpendicularmente à madeira. Este corte produz cavacos formados pelo cisalhamento transversal e pela flexão das fibras geradas pela passagem da ferramenta de corte (HOADLEY, 2000). Além das serras de fitas, as serras circulares também podem apresentar o corte tipo 90° - 90° . Este fato é possível quando o disco da ferramenta corta o mais próximo possível da parte central. A fim de se obter uma superfície de qualidade neste corte é necessário a utilização de ângulos de ataque elevados (30° a 40°) e uma afiação de qualidade para a ferramenta utilizada (HOADLEY, 2000). Geralmente, para este corte são requeridas forças maiores que aquela exercida no corte 90° - 0° , enquanto que o corte 0° - 90° requer menores energias de corte quando comparadas às outras direções (KOCH, 1985; NÉRI et al., 1999).

No corte ortogonal podem ser encontrados ainda três ângulos de cortes principais: o ângulo de ataque (α), ângulo da ferramenta (β) e o ângulo de folga (γ). O ângulo de ataque (α) influencia a penetração da aresta de corte na madeira e ocorre durante a liberação do cavaco. Um ângulo de ataque baixo gera um esforço significativo na ferramenta de corte, entretanto não ocasiona o corte da superfície; um ângulo de ataque mais alto diminui os esforços, porém pode ocasionar o rompimento das fibras (JODIN, 1994). Normalmente, cada espécie apresenta uma faixa ótima para a atuação do ângulo de ataque, visando obter a melhor qualidade da superfície a ser usinada (WOODSON; KOCH, 1970; KOCH, 1985). O ângulo da ferramenta (β) está relacionado à resistência da ferramenta de corte ao choque e ao desgaste. Neste caso, os ângulos mais adequados são indicados de acordo com o tipo de usinagem, de ferramenta e do material (JODIN, 1994). O ângulo de folga (γ) serve para evitar que a ferramenta se dobre ao entrar em contato com a madeira. Este ângulo deverá ter um valor mínimo, permitindo-se assim a redução do contato da superfície de folga da ferramenta com a peça de madeira (WOODSON; KOCH, 1970; KOCH, 1985; JODIN, 1994).

O corte periférico é realizado com o uso de facas colocadas na periferia de uma ferramenta rotativa onde cada faca atua na superfície intermitentemente; a superfície resultante é caracterizada por uma série de traços produzidos pelo contato sucessivo das facas com a madeira (Figura 3) (KOCH, 1985). A qualidade da superfície aumenta à medida que o comprimento de onda de usinagem diminui, portanto, a velocidade de avanço é um dos parâmetros mais importantes para obter uma boa qualidade superficial (KOCH, 1985; COOL, 2011). A diminuição da velocidade de avanço ocasiona uma diminuição da altura, do comprimento de onda e da componente normal da força de corte (KOCH, 1985; CARRANO et al., 2004; ISKRA; HERNÁNDEZ, 2012). A profundidade de passagem também tem um efeito importante na qualidade do corte periférico, assim, uma menor profundidade de corte ocasiona uma boa qualidade da superfície (CARRANO et al., 2004).

O corte periférico pode assumir diferentes formas, podendo ocorrer com ferramentas de corte reto, sendo a aresta de corte perpendicular à velocidade de avanço; e com ferramentas de cortes helicoidais (COOL, 2011). O corte periférico é chamado de aplainamento para processos de usinagem de madeira que envolvem a remoção de cavacos em operação de

desbaste ou acabamento da superfície. O corte ortogonal é considerado um caso particular de usinagem periférica, onde o diâmetro do porta-faca tende ao infinito (NÉRI et al., 1999). Os mesmos tipos de cavacos presentes no corte ortogonal paralelo às fibras são encontrados no corte periférico, porém a geometria é diferente.

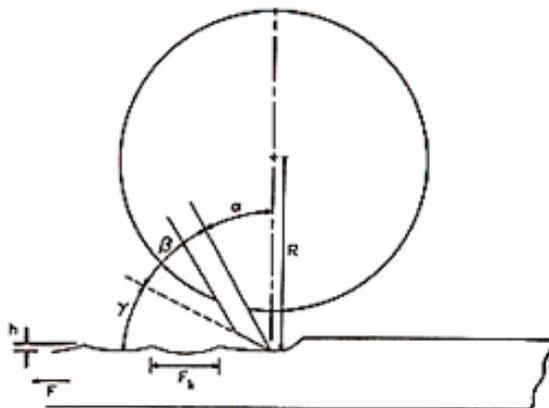


Figura 3. Esquema do corte periférico, onde: α = ângulo de ataque, β = ângulo da ferramenta, γ = ângulo de folga, h = altura da onda de usinagem, F_h = largura da onda de usinagem, F = velocidade de alimentação da peça de madeira e R = raio do cilindro de corte (WENGERT, 1988).

Os movimentos relativos entre o avanço da peça e o sentido de giro de corte da ferramenta podem ser classificados em cortes concordantes e discordantes (GONÇALVES, 2000; LUCAS FILHO, 2004). Nos cortes concordantes, o movimento de corte da ferramenta e o movimento de avanço do material encontram-se sincronizados, ou seja, no mesmo sentido. O contato do gume da ferramenta com a madeira forma um ponto de impacto, dando início à operação de corte; os gumes da ferramenta vão cortar da espessura maior para a menor, não formando tensões de lasqueamento. Já no corte discordante, o movimento de corte da ferramenta e o movimento do avanço do material encontram-se opostamente sincronizados, é o método mais empregado, principalmente em equipamentos convencionais de avanço manual devido a menor peculiaridade para o operador e o menor uso de potência de corte (CAMARGO, 2002).

A produção de cavaco neste tipo de corte é em formato de foice, entretanto para a usinagem do corte discordante são encontrados as seguintes peculiaridades (KOCH, 1985; HOADLEY, 2000; ISKRA; HERNÁNDEZ, 2012):

- os ângulos de ataque e de saída mudam continuamente em função da profundidade de corte. O ângulo de ataque aumenta e o de saída diminui conforme a aresta executa o percurso efetivo de corte;
- a espessura do cavaco vai de um valor mínimo, no momento de contato, até um valor máximo, onde a ferramenta emerge da madeira. No valor máximo encontram-se cavacos do tipo I do corte $90^\circ-0^\circ$; e
- quando a espessura do cavaco é mínima, pode ocorrer uma ruptura ou cisalhamento, formando espirais contínuas, gerando cavacos do tipo II do corte $90^\circ-0^\circ$, associados à uma boa qualidade da superfície.

De acordo com Koch (1985) e Iskra e Hernández (2012), o corte periférico pode ainda ser decomposto por duas forças resultantes produzidas durante o corte: a força paralela (F_P) e a força normal (F_N) (Figura 4). A magnitude e a direção destas forças dependerão de vários

fatores específicos relacionados à ferramenta de corte, às condições de trabalho, assim como, às características do material.

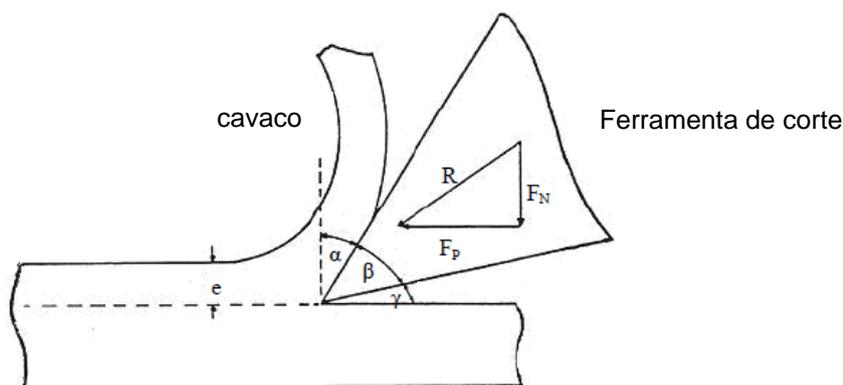


Figura 4. Ângulo de corte e componentes das forças, onde: R = força resultante, F_N = força normal, F_P = força paralela, e = espessura do corte, α = ângulo de ataque, β = ângulo da ferramenta e γ = ângulo de folga (KOCH, 1985).

No aplainamento, a força normal pode agir para baixo comprimindo os tecidos superficiais, causando o esmagamento da célula e grã levantada (STEWART, 1980; ISKRA; HERNÁNDEZ, 2012) ou para cima provocando o enfraquecimento dos tecidos superficiais. Devido à importância da força de corte na formação de cavacos e na qualidade da superfície, estas variáveis têm sido estudadas por vários pesquisadores entre elas estão o desgaste das ferramentas de corte (HERNÁNDEZ; ROJAS, 2002; HERNÁNDEZ; de MOURA, 2002; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a; COOL; HERNÁNDEZ, 2011a; HERNÁNDEZ et al., 2014) e o ângulo de ataque das ferramentas (WOODSON; KOCH, 1970; NERI et al., 1999; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a; HERNÁNDEZ; COOL, 2008; COOL; HERNÁNDEZ 2011a; HERNÁNDEZ et al., 2014; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016).

2.2.2 Lixamento

O lixamento da madeira é uma operação de usinagem mais comum para acabamento das superfícies, tendo como finalidade principal produzir superfícies uniformes e corrigir as irregularidades presentes na madeira, principalmente a remoção das imperfeições deixadas por facas durante o aplainamento (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a). Este processo também é usado para preparar a superfície da madeira antes da aplicação de produtos de acabamento (UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016a). O processo de lixamento é realizado com auxílio de lixas, as quais são compostas por grãos abrasivos presentes em um papel, os quais são conectados por um aglutinante; portanto, o lixamento pode ser definido como uma sequência de danos mecânicos produzidos na superfície por grãos abrasivos (COOL; HERNÁNDEZ, 2011a). Este procedimento é parecido com o aplainamento, quando se considera um ângulo de ataque da ferramenta baixo ou negativo. Recomenda-se que o lixamento da superfície seja sempre realizado no sentido das fibras, a fim de evitar danos e assim comprometer o processo (ALVES et al., 2010). Segundo Martins et al. (2011a), superfícies lixadas também podem apresentar fibras arrancadas e arrepiadas pela ação abrasiva.

As lixas utilizadas no lixamento são constituídas de grãos abrasivos de diversas naturezas tais como quartzo, granada, óxido de alumínio, carboneto de silício e óxido de

silicone e dureza elevada (WATAI, 1995; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a; COOL; HERNÁNDEZ, 2011a; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016a). Dentre as mais utilizadas estão às lixas constituídas de carboneto de silício e óxido de alumínio, sendo as lixas de óxido de alumínio utilizadas para lixamentos mais pesados, pois são resistentes à altas velocidades e pressões. O óxido de alumínio produz superfícies de melhor molhabilidade, sendo mais adequadas para aplicação de verniz. Os grãos de carboneto de silício não suportam altas pressões, porém são utilizadas para o lixamento fino, pois produzem superfícies mais suaves e de maior qualidade, os quais são comumente aplicados na indústria de móveis (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a). Estes grãos abrasivos são responsáveis por deixar sulcos mais profundos e estreitos na superfície da madeira que aqueles produzidos pelo óxido de alumínio (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a).

As lixas apresentam ainda granulometrias diferenciadas, portanto, recomenda-se seguir uma ordem a fim de se obter uma superfície mais lisa. Neste caso, indica-se a utilização de lixas mais grossas no início do lixamento, os quais têm como objetivo remover as maiores imperfeições, seguidas pelas médias e finas. Indica-se ainda que a utilização das lixas seja progressiva não ultrapassando 50% em relação à abrasividade da lixa anterior (WATAI, 1995; FONTE, 2016). Em geral, quanto maior a granulometria da lixa, menor a rugosidade (KILIC et al., 2006).

As diferenças entre as superfícies lixadas e aplainadas são observadas na anatomia do material. As superfícies usinadas com lixas são identificadas pela presença de células esmagadas e levantadas ocasionadas pela ação abrasiva e lúmens obstruídos pelo pó produzido durante o lixamento; uma das consequências desse processo é a maior dificuldade à penetração de adesivos e produtos de acabamento. As superfícies aplainadas, por sua vez, apresentam maior quantidade de células abertas como vasos e fibras e melhor sensação de lisura, facilitando a penetração de revestimentos (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a; COOL; HERNÁNDEZ, 2011a).

Inúmeros estudos tem sido realizados visando otimizar o processo de lixamento, através da utilização de programas de lixamento. O programa de lixamento deve considerar principalmente, a destinação final da madeira, assim como, o tipo de revestimento a ser aplicado na superfície lixada (WILLIAMS; MORRIS, 1998). O processo de lixamento no programa começa com a utilização de uma lixa mais grossa, passando posteriormente para um estágio mais fino (WILLIAMS; MORRIS, 1998). Os papéis de granulometria maior destinam-se a lixar mais grosso, mais rápido e mais profundo. Já os papéis de granulometria menores são usados para o trabalho de acabamento (LI LIHRA; GANEV, 1999; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a). No programa de lixamento, cada etapa deve reduzir os danos deixados na superfície pelo passo anterior. O ideal é que o lixamento ocorra primeiro com a melhor granulometria capaz de lixar a superfície da madeira sem ser saturada pelas partículas, não sendo indicado pular mais do que um passo na escala granulométrica durante a continuação do programa de lixamento (LILIHRA; GANEV, 1999). William e Morris (1998) ressaltam ainda que, para o programa de lixamento, é importante que a granulometria utilizada na última etapa de lixamento seja indicado com base na espécie, na orientação do lixamento e no tipo de revestimento a ser aplicado na superfície lixada.

Estudos realizados por de Moura e Hernández (2006a) avaliaram a superfície da madeira de *Acer saccharum*, através de três programas de lixamento 100, 100-120 e 100-120-150 e quatro velocidades de alimentação (8, 10, 12 e 14 m/min) e observaram uma diminuição da rugosidade e do dano celular para o lixamento de granulometria de 100 à 120.

2.3 Qualidade da superfície usinada da madeira

A qualidade da superfície usinada é uma das características mais importantes para qualquer produto à base de madeira. Neste caso o termo “qualidade” é muito complexo, pois a qualidade geral da superfície da madeira é influenciada por uma série de propriedades físicas, mecânicas e estéticas.

O conceito de qualidade de usinagem pode ser apresentado em duas abordagens diferentes (SILVA et al., 2009). Na primeira abordagem, a qualidade é conceituada por meio de valores normativos tal como o cálculo do avanço por dente (f_z) ou profundidade do arco ciclóide (t), sendo expresso em marcas por polegadas linear ou em milímetros (Figura 5) (WEISSENSTEIN, 2000). A segunda abordagem considera além dos parâmetros citados acima, a presença de falhas na superfície decorrentes da estrutura anatômica da madeira, ou seja, dos diferentes tipos, dimensões e orientações de células. A variação anatômica pode ocasionar defeitos na forma de buracos, trincas e pré-rachamentos (BONDUELLE et al., 2002; SILVA et al., 1999, 2009).

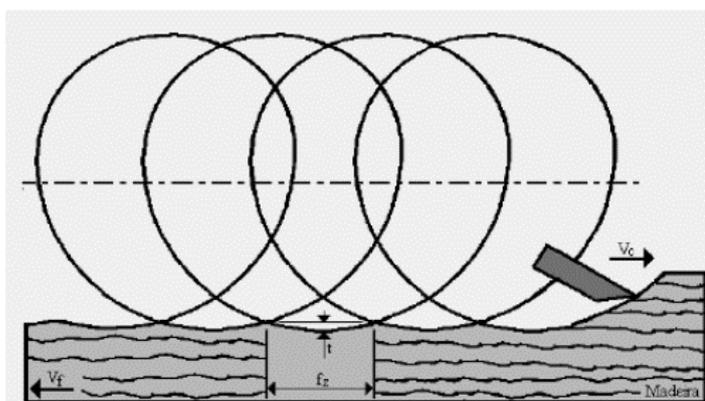


Figura 5. Valores normativos de um aplainamento, onde: f_z = avanço por dente ou onda de usinagem, t = profundidade do arco ciclóide ou altura da onda de usinagem, V_c = velocidade de corte das facas e V_f = velocidade de avanço da peça de madeira (WEISSENSTEIN, 2000).

De acordo com Csanády et al. (2015), a qualidade da superfície usinada da madeira pode ser caracterizada pela(s):

- estabilidade da superfície e fotodegradação (resistência à radiação ultravioleta (UV), à luz visível e à radiação infravermelha) e distorções da camada superficial devido à compactação;
- relações de umidade (ângulo de contato, molhabilidade, penetração de líquidos e troca de umidade com o ar);
- propriedades mecânicas da superfície (dureza da superfície, resistência à cargas por fricção abrasiva e estabilidade da superfície em condições externas);
- propriedades estéticas (cor, leveza, brilho, descoloração por tratamentos artificiais ou devido à efeitos ambientais, estabilidade de cor em condições externas e capacidade de polimento); e
- geometria da superfície (ondulação, parâmetros de rugosidade, desvio padrão dos parâmetros de rugosidade e defeitos internos que aparecem na superfície).

Dentre os fatores citados acima, serão abordados á seguir os fatores mais importantes no contexto da tese, sendo eles a molhabilidade da superfície (ângulo de contato e energia superficial) e a rugosidade superficial (análises tridimensionais – 3D).

2.3.1 Molhabilidade da superfície

O fenômeno de molhabilidade está diretamente relacionado com as interações moleculares entre um líquido e um sólido em contato direto na interface de um sólido (BERG, 1993). Esta análise é muito utilizada para estimar as propriedades de adesão da madeira. Como o mecanismo de adesão começa com a umectação da superfície, acredita-se que a molhabilidade possa ser um bom indicador do potencial de adesão de uma superfície. Segundo Wulf et al. (1997), o substrato deve ter boa molhabilidade para obter um revestimento de alta qualidade, independentemente do tipo de produto aplicado.

A molhabilidade pode ser definida como a facilidade e/ou a eficiência de espalhamento de um determinado líquido sobre uma superfície sólida em contato (STANGERLIN, 2013). Este fenômeno é avaliado através do ângulo de contato que é formado na interface sólido/líquido/gás. Macroscopicamente, as manifestações envolvidas na interface de um sólido podem ser divididas em três etapas distintas: (1) formação de um ângulo de contato na interface sólido/líquido/vapor; (2) espalhamento de um líquido sobre a superfície de um sólido; e (3) absorção do líquido na superfície do sólido (BERG, 1993; STANGERLIN, 2013).

A molhabilidade pode ser caracterizada através de três parâmetros termodinâmicos, que são: o trabalho de adesão, o ângulo de contato e a energia livre da superfície (tensão superficial) (STANGERLIN, 2012).

O trabalho de adesão é definido como o trabalho necessário para separar uma unidade de área da interface sólido-líquido, ao qual é dado pela Equação 1 de Dupré (1869):

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

onde: W_{SL} = trabalho de adesão (mJ/m^2), γ_S = tensão superficial do sólido (mJ/m^2), γ_{LV} = tensão superficial do líquido (mJ/m^2), γ_{SL} = tensão interfacial sólido/líquido (mJ/m^2).

Young (1805) desenvolveu uma relação entre a tensão superficial de um líquido e um sólido, a tensão interfacial entre o sólido e o líquido, e o ângulo de contato de uma gota de um líquido depositada em uma determinada superfície horizontal (Equação 2).

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} * \text{Cos}\theta \quad (2)$$

onde: γ_{SV} = tensão interfacial sólida/vapor ($\text{mJ}.\text{m}^{-2}$), γ_{SL} = tensão interfacial sólido/líquido ($\text{mJ}.\text{m}^{-2}$), γ_{LV} = tensão interfacial líquido/vapor ($\text{mJ}.\text{m}^{-2}$), θ = ângulo de contato.

Através da combinação das equações de Dupré (1869) (Equação 1) e de Young (1805) (Equação 2), obtém-se a equação de Dupré-Young (Equação 3):

$$W_{SL} = \gamma_{LV}(1 + \text{Cos}\theta) \quad (3)$$

O ângulo de contato é uma técnica simples e rápida de ser executada, além de fornecer informações importantes a respeito das tensões superficiais do sólido e também da hidrofobicidade ou hidrofiliicidade de uma superfície (MYERS, 1999). No entanto, a medição direta e precisa do ângulo de contato mediante técnicas ópticas para determinar as características termodinâmicas de uma determinada superfície é dificultada em razão da

heterogeneidade da madeira (WÅLINDER, 2000). Segundo Myers (1999), ao se depositar uma gota de um líquido sobre a superfície de um sólido, ela pode se espalhar uniformemente sobre toda a superfície sólida, formando quase que um filme fino ou formar uma gota esférica sobre a superfície. Quando o líquido forma um filme, o ângulo de contato (θ) é igual à zero e o sólido é completamente molhado pelo líquido, ou seja, a sua superfície apresenta propriedades hidrofílicas. Para ângulos maiores que zero ($\theta > 0$), o sólido pode ser descrito como molhado ou “molhante” quando θ for menor ou igual 30° ; como “parcialmente molhante” quando θ estiver entre 30° e 89° e “não molhante” para valores iguais ou maiores que 90° (Figura 6). Os líquidos vão apresentar formas esféricas, pois nesta situação, acaba ocorrendo uma menor área superficial para um dado volume. No entanto, é possível que outras forças atuem sobre a gota, como a força da gravidade, causando um achatamento nas esferas. A fim de reduzir a atuação dessas forças, é necessário que o líquido seja disperso em pequenas quantidades, gotículas, criando-se assim uma elevada área superficial por unidade. No caso das superfícies hidrofóbicas, a gotícula assume uma forma quase totalmente esférica (ATKINS, 2003).

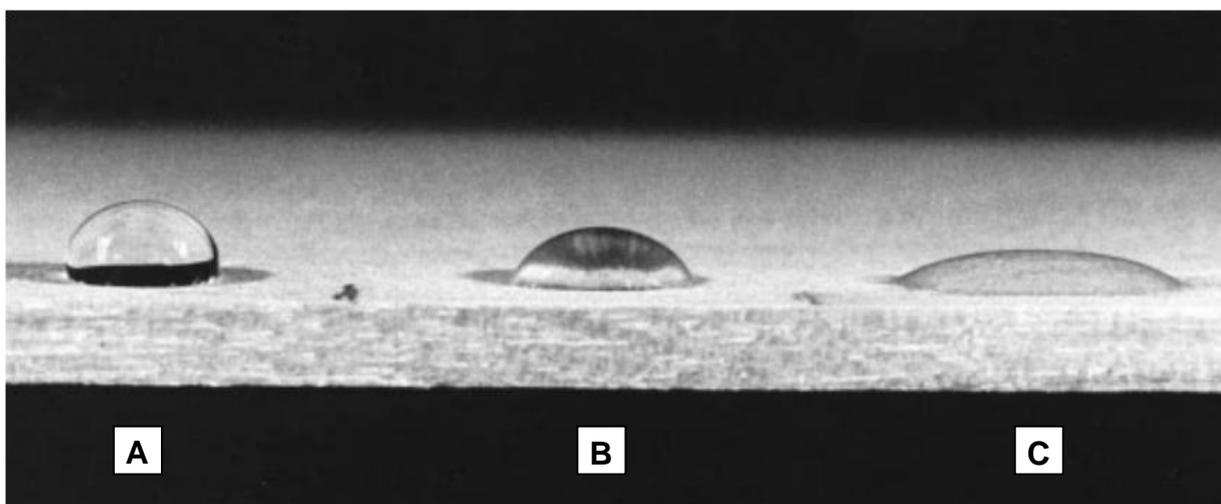


Figura 6. Diferentes comportamentos de molhabilidade na superfície de uma lâmina de madeira: (A) não molhada, (B) parcialmente molhada e (C) molhada (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

O ângulo de contato pode ser definido, como sendo o ângulo formado entre a tangente da superfície do líquido e da superfície líquido/sólido em um ponto de contato líquido/sólido (Figura 6). Entretanto, a madeira apresenta superfícies irregulares e estas irregularidades irão afetar diretamente o cálculo do ângulo de contato. Quando uma gota de um líquido é aplicada na superfície da madeira, o ângulo de contato apresenta uma variação em função do tempo. A molhabilidade de um substrato é, portanto muitas vezes, mensurada a partir de um ângulo de contato medido a um certo tempo de molhamento, neste casos, o ângulo de contato inicial (θ_i), o ângulo de contato dinâmico (θ_d) e o ângulo de contato de equilíbrio (θ_e) são os mais indicados. O ângulo de contato inicial estabelece a afinidade da superfície da madeira com o líquido (BOEHME; HORA, 1996) enquanto que o ângulo de contato de equilíbrio é aquele em que a taxa de mudança do diâmetro e da altura da gota permanece constante após um determinado tempo (GINDL et al., 2001a).

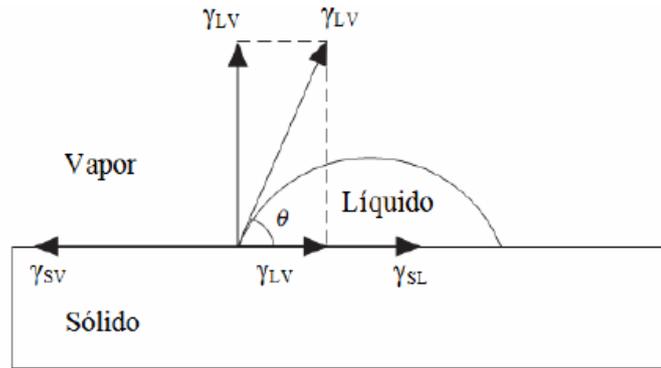


Figura 7. Esquema ilustrativo da medição do ângulo de contato (θ), onde: γ_{sv} = tensão interfacial sólida/vapor, γ_{LV} = tensão interfacial líquido/vapor e γ_{SL} = tensão interfacial sólido/líquido (mJ/dm^2) (WÅLINDER, 2000).

Os líquidos mais utilizados nos testes de molhabilidade da madeira são: água destilada, formamida e glicerina. Cada líquido é caracterizado por propriedades químicas e físicas, tais como viscosidade e tensão superficial (STEHR et al., 2001) e, portanto, vai interagir com o substrato de maneiras diferentes. O ângulo de contato pode ser determinado através de várias técnicas, tais como: bolha de ar cativa, bolha de ar séssil, placa inclinada de Wilhelmy e a gota séssil. A técnica da gota séssil é tradicionalmente mais utilizada e se baseia na observação do perfil da gota depositada sobre a superfície de um sólido (CHAN, 1994).

A variação do ângulo de contato de um líquido sobre a madeira vai depender de alguns fatores: características anatômicas, acabamentos, tipo de corte, teor de umidade. De acordo com vários autores (MATANIS; YOUNG, 1997; SCHEIKL; DUNKY, 1998; WÅLINDER, 2000; GINDL et al., 2004), a molhabilidade e a colagem podem ser afetadas por algumas propriedades e características da madeira, em particular aquelas que têm influência na sua superfície, tais como:

- densidade: as madeiras mais densas estão normalmente associadas às maiores contrações ou inchamentos, o que influencia negativamente a resistência adesão;
- porosidade: afeta o escoamento do adesivo no revestimento; na seção transversal a absorção da cola é mais rapidamente de modo que se obtém uma camada mais fina;
- rugosidade: é afetada pela anatomia da madeira (vasos, células radiais, canais resiníferos, entre outros) e pelo preparo da superfície (corte, aplainamento, lixamento). Uma rugosidade mais elevada pode afetar a colagem positivamente, uma vez que aumenta a superfície e as regiões para penetração e fixação do adesivo, mas também pode afetar negativamente devido o contato entre as superfícies a colar ser menor;
- envelhecimento: está relacionado com a migração de extrativos hidrófobos ao longo do tempo que prejudicam a molhabilidade devido a inativação da superfície;
- extrativos: pertencem quimicamente a três grandes grupos de substâncias: terpenos, resinas e fenóis, que afetam algumas propriedades da madeira (cor, cheiro, durabilidade). A sua composição e quantidade relativa, varia entre espécies, idade e origem. A acidez da superfície também interfere com a polimerização dos adesivos. Os extrativos solúveis em água podem ser dissolvidos nos adesivos aquosos, mas os extrativos insolúveis em água, como os terpenos e ácidos graxos, diminuem a molhabilidade;

- defeitos: a presença de nós, por exemplo, afeta a aptidão à colagem uma vez que estes absorvem a cola de maneira diferente; e
- contaminação da superfície: a qual pode tornar a madeira impermeável quimicamente, no que diz respeito à aderência dos adesivos por contaminantes químicos do ar (poeiras); extrativos hidrófobos, quimicamente ativos que migram para a superfície; oxidação e pirólise dos sítios ativos para ligação devido à secagem excessiva; impregnação com produtos preservadores e outros produtos químicos. A deterioração física e contaminação química vão interferir na molhabilidade, escoamento e penetração dos adesivos, portanto, as superfícies devem estar limpas e sem poeiras.

2.3.1.1 Energia superficial

As interfaces entre superfícies e líquidos são regiões que apresentam características diferentes daquelas encontradas no interior. Os átomos da superfície ou interface interagem com seus vizinhos diferentemente dos átomos do interior dos líquidos. Isso faz das superfícies e das interfaces regiões de maior energia e que apresentem comportamentos diferentes daquele do interior. A energia superficial (γ), também conhecida como tensão superficial (o termo energia superficial é normalmente usado para superfícies sólidas, enquanto que a tensão superficial refere-se normalmente a uma fase líquida), pode ser definida como uma força disponível em uma superfície sólida em atrair as moléculas de um líquido. A energia superficial e a tensão superficial são definições equivalentes, porém quando se refere à energia por unidade de área, é usado o termo “energia livre da superfície” que é o termo mais geral no sentido que se aplica a materiais sólidos e não apenas a líquidos (CSANÁDY et al., 2015). Este parâmetro é baseado na medida do ângulo de contato por um ou mais líquidos onde a tensão superficial é conhecida (GINDL et al., 2001b). Em geral, a molhabilidade da superfície ocorre quando a tensão do líquido (γ_L) é inferior ou igual à energia superficial do sólido (γ_S). Para uma boa molhabilidade, a energia superficial deve ser a mais alta possível enquanto que a tensão superficial do líquido deve ser mínima (GRAY, 1992; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005; 2007; CSANÁDY et al., 2015). De acordo com a equação de Young, existe um relação entre a energia superficial do sólido (γ_S), o ângulo de contato (θ), a tensão superficial do líquido (γ_L) e a energia da interface sólido – líquido (γ_{SL}):

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cdot \cos\theta \quad (4)$$

Entretanto, para calcular a energia superficial do sólido (γ_S), é necessária uma segunda equação para eliminar a energia da interface sólido – líquido (γ_{SL}) da equação de Young. Para isso, foram criados vários modelos matemáticos citados na Tabela 1.

Entre os principais métodos estão à tensão superficial crítica de Zisman, o método da média harmônica de Wu e a teoria ácido-base de Lifshitz-van der Waals/Lewis. No método de Zisman, a energia superficial é determinada usando a tensão crítica do líquido (γ_c), porém ela é aplicável apenas quando as proporções das interações polares e dispersivas são semelhantes para sólido e líquido, e devido à esta restrição, outros métodos devem ser utilizados para determinar a energia superficial do sólido (GINDL et al., 2001b). O método da média harmônica descrito por Wu (1971) permite determinar a energia superficial através da utilização de dois ou mais líquidos que apresentem componentes polares e dispersivos. A equação calcula a energia superficial de um sólido a partir da medição única do ângulo de contato usando um líquido de tensão superficial conhecida. O método ácido-base de Lifshitz-

van der Waals/Lewis é mais complexo quando comparado aos dois métodos anteriores, porém, este método fornece mais informações, podendo explicar melhor o comportamento de revestimentos de acabamento em madeira (GINDL et al., 2001b). Este método considera as forças hidrofóbicas de atração e as forças hidrofílicas repelentes durante as interações ácido/base de Lewis (GARDNER, 1995, GINDL et al., 2001b). A tensão interfacial entre o sólido e o líquido é determinada pela soma das forças dispersivas de Lifshitz-van der Waals (γ_S^{LW} e γ_L^{LW}) com as forças ácido/base de Lewis ($\gamma_S^+ \gamma_L^-$ e $\gamma_S^- \gamma_S^+$) e o ângulo de contato de pelo menos três líquidos, sendo dois destes polares. A parte polar é decomposta em um grupo aceitador de elétrons (γ_i^+) correspondente a um ácido de Lewis e outro grupo doador de elétrons (γ_i^-) correspondente a uma base de Lewis. De certa forma, este método acentua significativamente o caráter básico dos sólidos em detrimento de sua acidez (UGULINO, 2016).

Tabela 1. Modelos para calcular a energia livre da superfície (KRÜSS, 2011).

Modelo de acordo com o(s) autor(es)	Componentes de interação
Fowkes (1964)	Parte dispersa e parte não dispersa
Owens-Wendt-Rabel e Kaelble (1969)	Parte dispersa e polar
Wu (1971)	Parte dispersa e polar
Schultz	Parte dispersa e polar, medida em fase líquida a granel
Oss, Good (ácido-base) (1992)	Parte ácida de Lewis e base de Lewis
Fowkes estendidos (1997)	Parte dispersa e polar e parte de ligação de hidrogênio
Zisman (1964)	Nenhuma divisão em componentes; determinação da tensão superficial crítica
Equação Neumann de Estado (1987)	Nenhuma divisão em componentes

A energia livre da superfície da madeira encontrada para uma base é alta, enquanto que para um ácido é baixo. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de energia livre da superfície para algumas espécies de madeira (GARDNER, 1995; CSANÁDY et al., 2015). Observa-se que a maior parte da energia livre da superfície da madeira é da componente Lifshitz-van der Waals (γ^{LW}), para a componente base este valor é suficientemente alto, porém para a componente ácida o valor é muito pequeno, quase zero (CSANÁDY et al., 2015).

Tabela 2. Parâmetros da energia livre da superfície para algumas espécies de madeira (GARDNER, 1995; CSANÁDY et al., 2015).

Espécies	γ^{LW} (mJ/m ²)	γ^+ (mJ/m ²)	γ^- (mJ/m ²)	γ^{AB} (mJ/m ²)	W_s (mJ/m ²)
Ash (<i>Fraxinus americana</i> L.)	42,63	0,001	67,35	0,52	43,15
Cherry (<i>Prunus serotina</i> Ehrh.)	47,46	0,42	28,00	6,84	54,30
Maple (<i>Acer saccharum</i> Marsh)	45,48	0,46	33,19	7,85	53,30
Red oak (<i>Quercus rubra</i> L.)	39,67	0,46	37,74	8,33	48,00
White oak (<i>Quercus spp.</i>)	34,04	0,39	22,80	5,98	40,00
Walnut (<i>Juglans nigra</i> L.)	37,97	0,09	58,93	4,63	42,55

γ^{LW} : componente não polar de Lifshitz-van der Waals. γ^+ : componente ácida. γ^- : componente base. γ^{AB} : componente polar. W_s : energia livre da superfície.

2.3.2 Rugosidade superficial

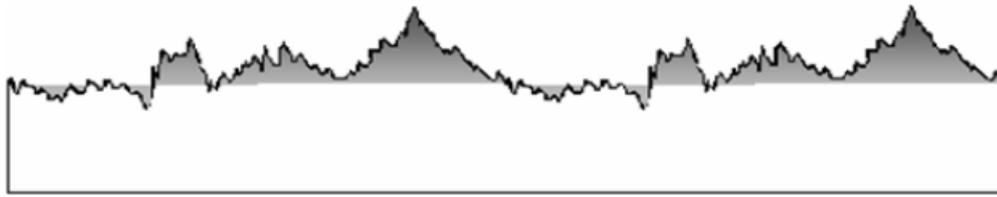
Os primeiros estudos sobre a rugosidade da superfície como propriedade dos materiais iniciou-se por volta de 1939 e foram aplicados principalmente à indústria metal mecânica. Somente à partir de 1950 é que surgiram os estudos sobre rugosidade da madeira (LUCAS FILHO, 2004).

Durante o processo de usinagem, são deixadas marcas ou sulcos pela ferramenta de corte na superfície da madeira. Essas irregularidades são chamadas de rugosidade superficial ou textura primária. A rugosidade pode ser determinada pela medição da altura, largura e forma dos picos e vales produzidos na madeira. Sua medição pode ser realizada em um plano bidimensional (2D) ou em uma determinada área em um plano tridimensional (3D) (CSANÁDY et al., 2015) (Figura 8). Devido à complexidade da superfície da madeira, muitos parâmetros de rugosidade foram desenvolvidos e propostos. Atualmente existem normas de padrões internacionais e nacionais que definem os parâmetros de rugosidade aceitos e fornecem recomendações para seu uso (CSANÁDY et al., 2015).

A rugosidade da superfície da madeira depende da estrutura anatômica (ex. grã, largura dos anéis de crescimento, lenho tardio/lenho inicial, lenho de reação, madeira juvenil, etc) (TAYLOR et al., 1999) e do tipo de usinagem empregado durante o processamento, tornando-se um fator importante na seleção, aplicação e durabilidade dos acabamentos. Estes fatores são responsáveis pela qualidade do produto final (WILLIAM et al., 1996; KILIC et al., 2006; MARTINS et al., 2011a).

A rugosidade pode ser medida através de equipamentos específicos, chamados rugosímetros, que permitem analisar os tipos de superfícies tentando compreender melhor os fenômenos ligados a microgeometria, bem como caracterizar os defeitos presentes na superfície da madeira (UGULINO, 2016). Os rugosímetros podem funcionar por contato (apalpação, pneumático, emissão acústica) ou sem contato (ópticos), tendo cada um suas vantagens e desvantagens (COELHO et al., 2005). O rugosímetro de agulha foi amplamente utilizado na determinação da rugosidade da superfície da madeira (HIZIROGLU et al., 2004; BURDURLU et al., 2005). Este dispositivo mede mecanicamente o perfil ao longo de uma linha em uma pequena área específica da superfície, fornecendo um perfil 2D da superfície; entretanto, ele apresenta baixa representatividade da superfície quando comparado aos rugosímetros de análise 3D (KILIC et al., 2006; VARANDA et al., 2010; MARTINS et al., 2011a) além de riscar a superfície da madeira devido ao seu contato com a agulha. Entre os métodos sem contato, o rugosímetro de análise 3D tem sido cada vez mais utilizado para medição da rugosidade da madeira devido à sua maior representatividade, podendo funcionar pela emissão de laser ou feixe de luz (HOBSON, 2014). Uma das técnicas 3D consiste na emissão de um raio laser na superfície a ser analisada, o qual é refletido e retornado em um certo ângulo para um sensor digital ligado à um sistema de visualização óptica que permite obter medições quantitativas no ponto 3D da superfície digitalizada (SANDAK; TANAKA, 2003). Outra técnica 3D bastante utilizada é o medidor óptico de luz branca. Este rugosímetro consiste na emissão de um feixe de luz transmitido para um espelho referência, o qual é refletido e guiado para a superfície da amostra. O número de linhas obtido pelo escaneamento da amostra é então traduzido em picos e vales, e através desses dados é possível obter uma imagem 3D da superfície (KEYENCE, 2019).

(A)



(B)

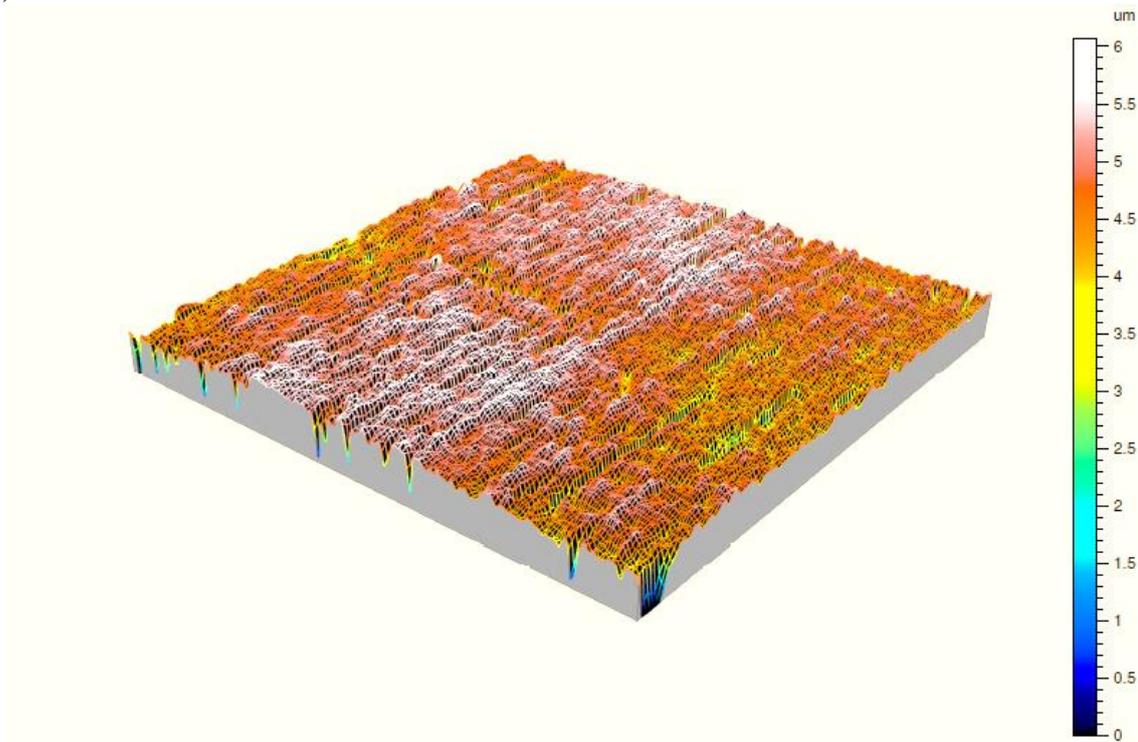


Figura 8. (A) Representação 2D do perfil de rugosidade de uma superfície (OLIVEIRA, 2004). (B) Imagem topográfica 3D da área de uma superfície obtida pelo rugosímetro óptico de luz branca MicroMeasure CHR 150.

A topografia de uma superfície pode ser caracterizada pelo seu nível de rugosidade e ondulação que juntamente com a forma de distribuição vão influenciar a qualidade da superfície usinada (UGULINO, 2016). Nenhum método de usinagem pode produzir uma superfície totalmente plana em materiais convencionais. Independente do método utilizado, a superfície sempre apresentará irregularidades (mais ou menos acentuadas) ou desvios assumindo diferentes formas geométricas. Para avaliar a textura superficial de um material em plano específico, podemos encontrar quatro tipos de perfil: (1) forma do perfil, (2) perfil primário (P), (3) perfil de rugosidade (R) e (4) perfil de ondulação (W). A forma do perfil serve como ponto de partida para todos os cálculos. O perfil primário (P) serve para avaliar diferentes parâmetros, sendo composto pelos perfis de rugosidade e ondulação. Os perfis de rugosidade (R) e ondulação (W) são derivados do perfil primário (P) da superfície (NBR 4287, 2002). O perfil de rugosidade (R) indica as flutuações na superfície em pequenos comprimentos de onda (alta frequência), caracterizado por máximos e mínimos locais com amplitudes e espaçamentos variáveis. Neste perfil, a aspereza da superfície é indicada pelos

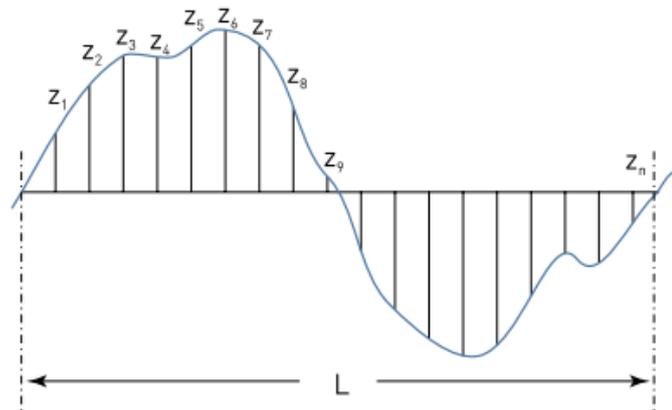
picos em superfícies 2D e topos em superfícies 3D. O perfil de ondulação (W) inclui irregularidades na superfície em grandes comprimentos de onda (baixa frequência). Para separar este perfil do perfil de rugosidade, é necessário optar pelo uso de um valor de comprimento adequado. Para superfícies de madeira usinadas, o comprimento mais utilizado é de 2,5 nm (FUJIWARA, 2004; GURAU et al., 2006; COOL; HERNÁNDEZ, 2011a; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016b).

A rugosidade é calculada a partir de diferentes parâmetros fornecidos pelo perfil principal de uma superfície. Portanto, um sistema de filtragem característico foi desenvolvido a fim de permitir extrair uma frequência representativa dos parâmetros de rugosidade visando excluir aqueles não representativos (KHAZAEIAN, 2006; UGULINO, 2016). Os filtros geralmente removem os componentes de comprimento de onda mais longo do sinal do perfil e operaram na forma de onda limpando o sinal antes de fornecer um resultado final a ser utilizado. Assim, a quantidade de dados utilizáveis em uma análise de rugosidade é reduzida pelo uso do filtro. O filtro gaussiano tem um comportamento distinto quando comparado aos demais filtros, e produz um bom perfil de rugosidade. Este filtro tem uma função interpoladora, que funciona atenuando os pontos de dados pela função gaussiana, amenizando a amplitude do sinal e dando mais suavidade aos contornos da superfície (WHITEHOUSE, 1994). Entretanto, este filtro não fornece um bom resultado em quebras de perfis, sendo, portanto, utilizados filtros de regressão gaussiana robusta para corrigi-lo. Os filtros de regressão gaussiana robusta reduzem os erros nas proximidades de picos e vales (ISO 16610-31, 2002).

2.3.2.1 Parâmetros de rugosidade 2D

Os parâmetros de rugosidade representam uma forma da expressão matemática entre a variação vertical da superfície, expressa pelos picos e vales, os quais possibilitam a comparação entre as texturas das diferentes superfícies (SILVA et al., 2008). Esses parâmetros caracterizam as propriedades de amplitude da superfície (NBR 4287 2002). De acordo com a norma JIS 0601 (2001), a rugosidade é definida pelos seguintes parâmetros:

R_a = média aritmética dos valores absolutos do desvio do perfil da linha média; baseia-se na medição da textura de uma superfície por meio do recurso do perfil (Figura 9). R_a é um parâmetro de rugosidade universalmente conhecido, em que o menor valor corresponde à menor rugosidade e vice-versa. A Tabela 3 apresenta as principais vantagens e desvantagens de se usar esse parâmetro (SECCO et al., 2007).



$$R_a = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n}{n} \rightarrow R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Figura 9. Derivação matemática para o cálculo da rugosidade média (R_a). (HOBSON, 2014).

Tabela 3. Vantagens e desvantagens do parâmetro de rugosidade R_a (SECCO et al., 2007).

Vantagens	Desvantagens
É o parâmetro de medição mais utilizado em todo mundo	O valor de R_a em um comprimento de amostragem indica a média de rugosidade. Por isso, se o pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito
É aplicável à maioria dos processos de fabricação	O valor de R_a não define a forma das irregularidades do perfil. Portanto, pode-se ter um valor de R_a para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem
Devido à sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital)	Nenhuma distinção é feita entre picos e vales
Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor. Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude	Para alguns processos de fabricação com frequência muito alta de vales e picos, como é o caso dos sinterizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro a altos níveis

R_q = raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil a partir da linha média dentro do percurso de medição. Este parâmetro é recomendado para análise de superfícies porosas e também é recomendado em superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados e principalmente em superfícies onde o parâmetro R_a tem pouca resolução. O gráfico de análise de R_q é idêntico ao gráfico do R_a (Figura 7).

R_p = altura máxima do pico do perfil de rugosidade acima da linha média no comprimento de medição (Figura 10).

R_v = profundidade máxima de um vale em relação ao perfil primário. Este parâmetro analisa o vale mais profundo (Figura 10), sendo muito utilizado para superfícies que tenham como principal função a retenção de fluídos (HOBSON, 2014).

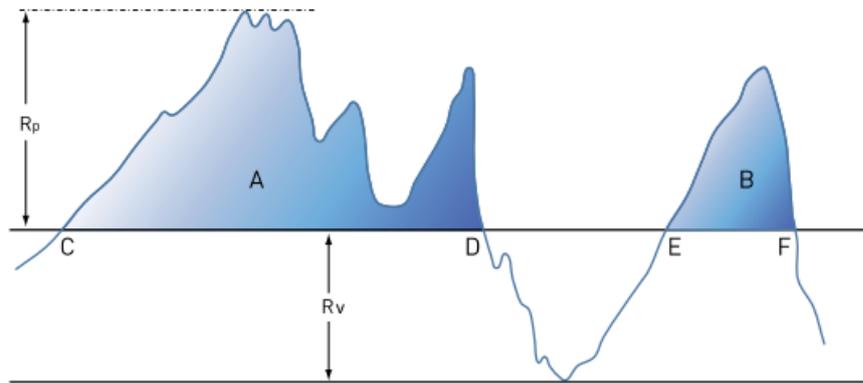


Figura 10. Análise gráfica dos parâmetros R_p e R_v , onde: A = área entre os pontos C e D e B = área entre os pontos E e F (HOBSON, 2014).

R_z = soma da altura média dos cinco picos mais altos do perfil e a profundidade dos cinco vales mais profundo do perfil, medidos de uma linha paralela à linha média (Figura 11).

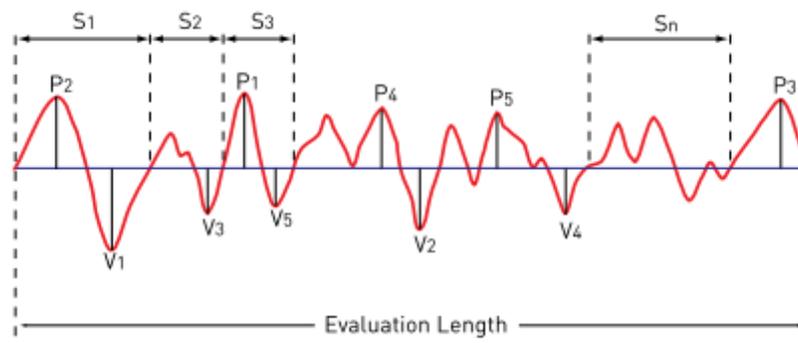


Figura 11. Análise gráfica do parâmetro R_z , onde: S = área dos elementos do perfil (picos e vales), P = picos, V = vales e S_n = área média dos elementos do perfil (picos e vales) (HOBSON, 2014).

R_t = soma da altura do pico máximo do perfil e a profundidade do vale máximo do perfil sobre a extensão avaliada (Figura 12).

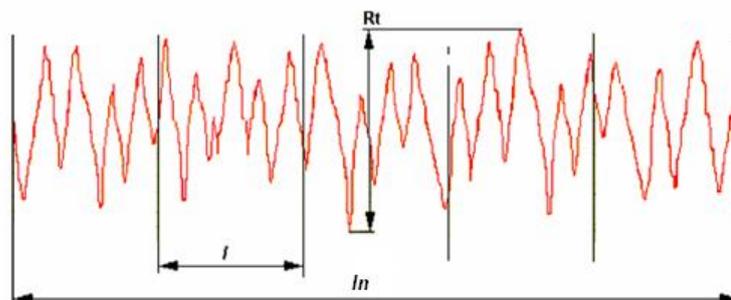


Figura 12. Análise gráfica do parâmetro R_t , onde: l = comprimento de medição e ln = comprimento de amostragem (*cut-off*) (HOBSON, 2014).

Os coeficientes de assimetria (R_{sk}) e achatamento (R_{ku}) podem ser usados para estudar a forma e a distribuição de aspereza da superfície, sendo definidos pela NBR 4287-2002 como:

R_{sk} = fator de assimetria do perfil avaliado – Skewness. Indica a assimetria da curva de distribuição da amplitude. Este parâmetro é fortemente influenciado por picos e depressões isoladas.

R_{ku} = fator de achatamento do perfil avaliado da curva de distribuição da amplitude. Da combinação de R_{ku} e R_{sk} , é possível indicar a presença de defeitos de projeções ou vazamentos que podem se produzir em uma superfície.

A curva Abbott é uma curva de proporção definida pela ISO 13565-2 (1996) e descreve o aumento da relação do comprimento do rolamento (geralmente em forma de S) da superfície em função do aumento da profundidade do perfil de rugosidade. Este método é usado para facilitar a avaliação do comportamento funcional das superfícies sujeitas a estresse mecânico pesado (ECH et al., 2007). A partir desta curva, é possível calcular a profundidade de rugosidade central (R_k), a profundidade normalizada dos vales (R_{vk}) e a altura dos picos padronizados (R_{pk}) dividindo o perfil em três seções: picos, vales e linha média.

2.3.2.2 Parâmetros de rugosidade 3D

Na análise de rugosidade 3D, caracterizada por parâmetros e métodos de cálculos pela ISO 25178 (2012), os prefixos não refletem mais distinções entre os componentes de rugosidade, ondulação ou estrutura como no caso dos parâmetros 2D. Os parâmetros de rugosidade 3D são representados pela letra maiúscula S e estão divididos em quatro categorias diferentes: amplitude, espaciais, híbridos e funcionais.

Os parâmetros de amplitude estão relacionados com a amplitude entre picos e vales e o plano médio sendo definidos pela Michigan Metrology (2014) como:

- *Média aritmética da altura* (S_a) = média do desvio-padrão entre picos e vales, sendo usado geralmente para avaliar a rugosidade da superfície (Figura 13). S_a é a extensão do parâmetro R_a ;

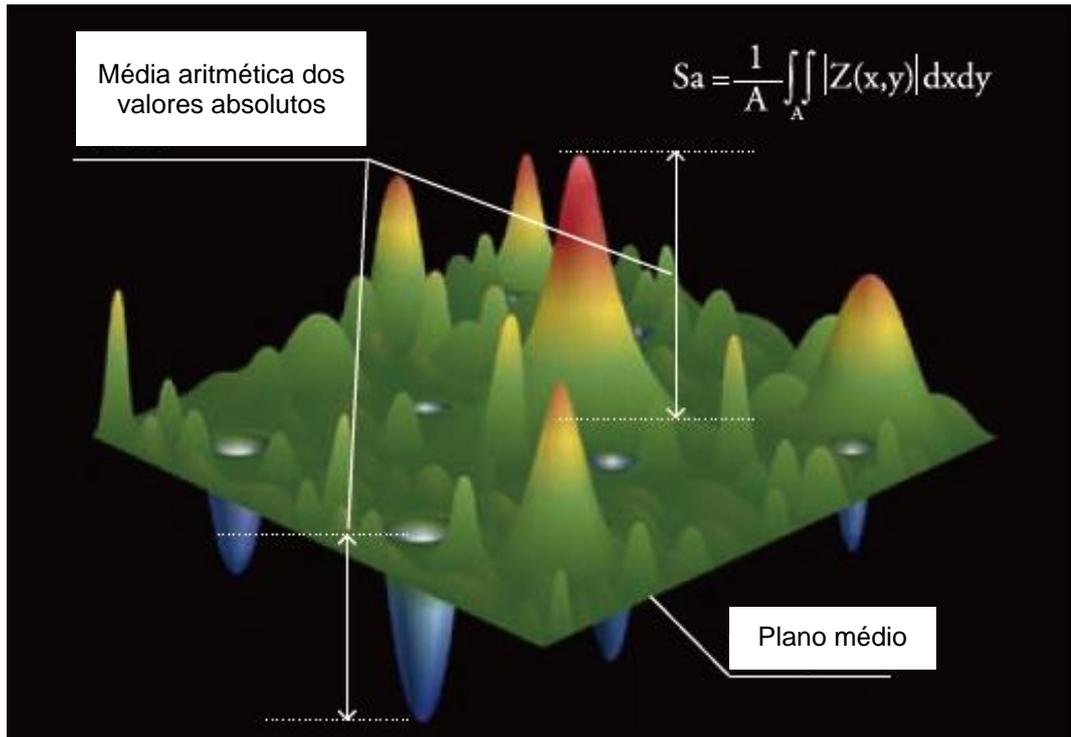


Figura 13. Representação gráfica do parâmetro S_a de uma superfície (ISO 25178-2012).

- *Raiz quadrática média da altura* (S_q) = representa o valor quadrático médio da raiz dos valores das ordenadas dentro da área de definição. É equivalente ao parâmetro R_q . Os parâmetros S_a e S_q correspondem a uma medida geral da textura da superfície. Superfícies com diferentes características podem apresentar o mesmo valor absoluto de S_a ou S_q , devido ao fato desses parâmetros não diferenciarem os picos dos vales, o espaçamento e os tipos de textura. Entretanto, determinando-se o tipo de superfície a ser analisada, ele pode ser usado para mostrar os desvios significativos nas características da textura. Normalmente S_q é indicado para descrever superfícies ópticas enquanto S_a é usado para as superfícies usinadas;
- *Assimetria do perfil - Skewness* (S_{sk}) = avalia a assimetria dos desvios da superfície em relação ao plano médio. É calculado a partir da curva de distribuição da amplitude mensurando a proporção de picos e vales em torno do plano médio. $S_{sk} > 0$ indica uma predominância maior de picos; $S_{sk} = 0$ uma superfície totalmente simétrica; e $S_{sk} < 0$ revela uma maior predominância de vales (Figura 14). Geralmente é indicado para especificar superfícies aprimoradas e no monitoramento de diferentes tipos de desgates;

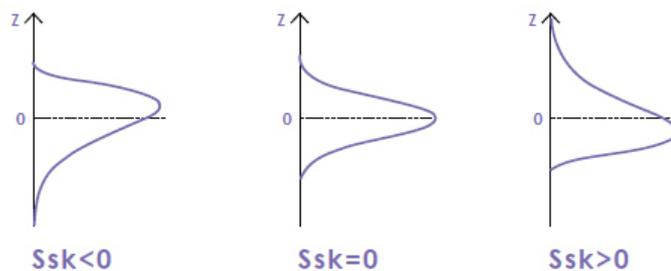


Figura 14. Valores de S_{sk} para diferentes perfis de rugosidade (ISO 25178-2012).

- *Curtose do perfil - Kurtosis (S_{ku})* = está relacionado com a forma de distribuição da amplitude, contribuindo para a determinação do coeficiente de achatamento. Para $S_{ku} > 3$, as superfícies indicam a presença de picos extremamente altos e vales profundos que compõem a textura da superfície; $S_{sku} = 0$ indica distribuição normal de picos e vales; e $S_{ku} < 3$ representa ausência de picos e vales (Figura 15);

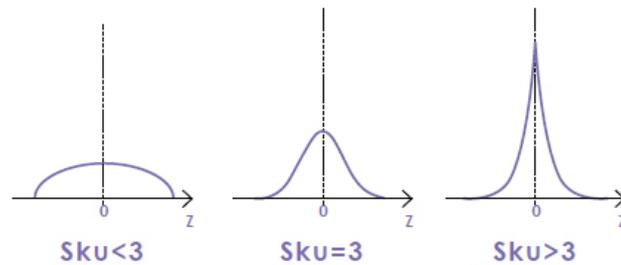


Figura 15. Valores de S_{ku} para diferentes perfis de rugosidade (ISO 25178-2012).

- *Altura máxima dos picos (S_p)* = valor máximo da altura do pico na superfície a ser medida;
- *Profundidade máxima dos vales (S_v)* = profundidade máxima do vale na superfície a ser medida. O vale é caracterizado pela área abaixo do nível médio da superfície;
- *Altura máxima do perfil (S_z)* = soma do valor máximo da altura do pico (S_p) e o valor máximo da profundidade do vale (S_v).

Os parâmetros espaciais são associados aos espaços horizontais entre picos e vales, sendo estes:

- *Relação do aspecto da textura da superfície (S_{tr})* = associada à isotropia da superfície. Pode ser calculada dividindo a distância horizontal na direção em que a função de autocorrelação decai com o valor (s) (0,2 por padrão) mais rápido do comprimento (S_{al}) pela distância horizontal na direção do decaimento mais lento de função de autocorrelação para o valor (s) (Figura 16).
- *Autocorrelação do decaimento mais rápido do comprimento (S_{al})* = representa a distância horizontal na direção em que a função de autocorrelação decai para o valor (s) (0,2 por padrão) mais rápido (Figura 16).

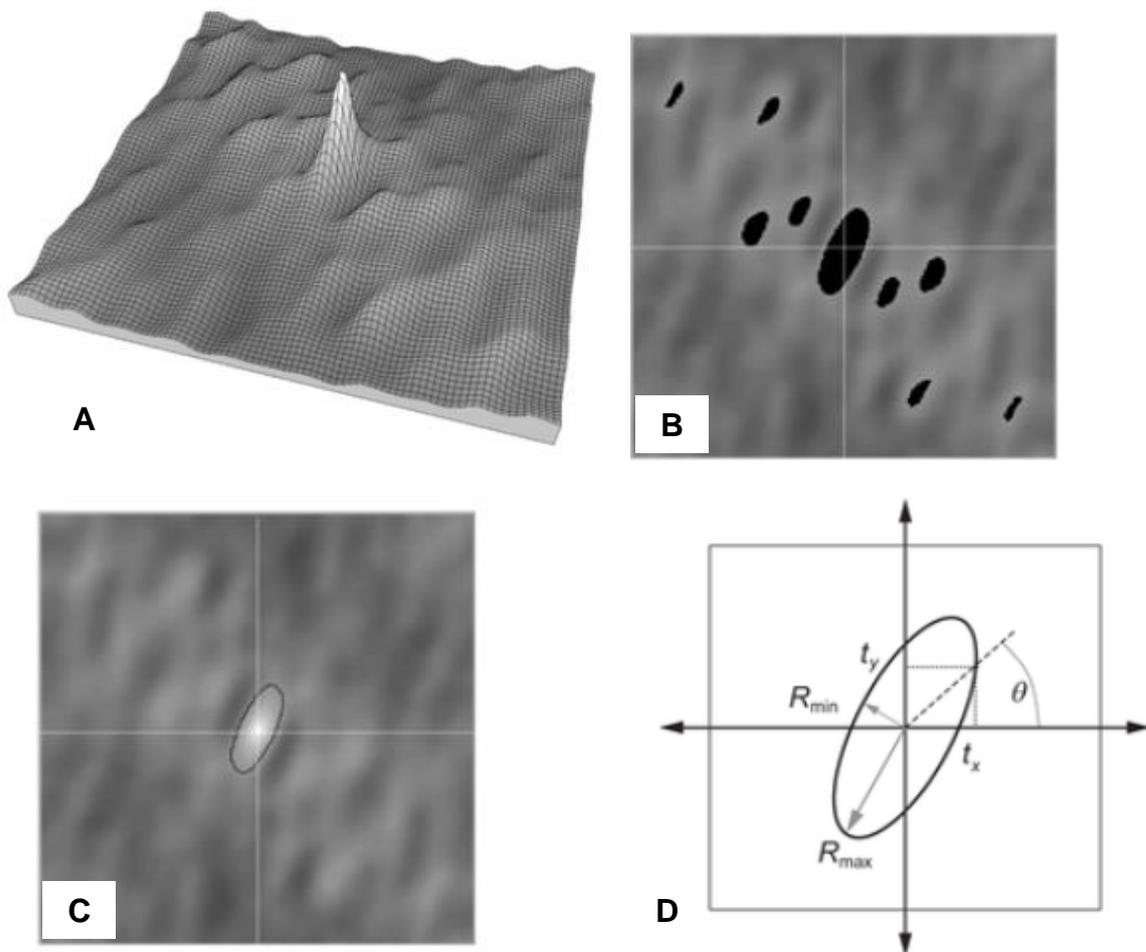


Figura 16. Procedimento para calcular S_{al} e S_{tr} . (A) Função de autocorrelação da superfície. (B) Autocorrelação de limite em s (os pontos pretos estão acima do limite). (C) Limite do limiar central. (D) Coordenadas polares que levam aos comprimentos de autocorrelação em diferentes direções, onde: R_{max} = rugosidade máxima, R_{min} = rugosidade mínima, e t_y , t_x = distância horizontal (ISO 25178-2012).

- *Densidade do ponto mais alto da superfície* (S_{ds}) = usado para avaliar a densidade de picos e vales;
- *Direção da textura da superfície* (S_{td}) = indica a direção mais significativa na superfície da textura.

Os parâmetros híbridos são combinações entre os parâmetros de amplitude e espaciais sendo eles:

- *Razão da área interfacial desenvolvida* (S_{dr}) = avalia o contato ou propriedades ópticas da superfície; e
- *Desvio médio da inclinação do quadrado da textura superficial* (S_{dq}) = calculado como um quadrado médio de declives em todos os pontos na área de definição.

Os parâmetros funcionais são:

- *Profundidade da rugosidade do núcleo* (S_k) = indica a diferença entre o nível mais alto e o nível mais baixo na superfície do núcleo;

- *Altura reduzida dos picos* (S_{pk}) = representa a altura média dos picos acima da superfície do núcleo; e
- *Profundidade reduzida dos vales* (S_{vk}) = expressa à média aritmética da profundidade do vale reduzida abaixo da superfície do núcleo. A Figura 17 representa as definições dos parâmetros funcionais.

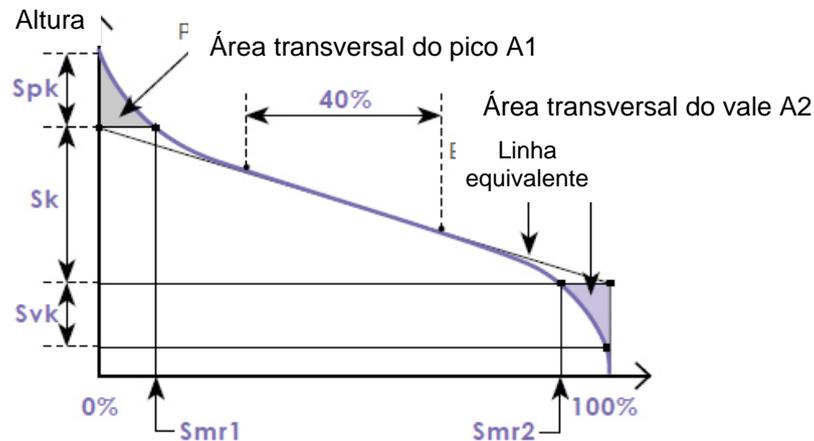


Figura 17. Definição dos parâmetros funcionais S_k , S_{pk} e S_{vk} , onde: S_{mr1} e S_{mr2} = proporções materiais (ISO 25178-2012).

2.4 Envernizamento da madeira

2.4.1 Teoria da adesão das superfícies

O comportamento da camada de um acabamento está intimamente ligado à adesão da superfície da madeira. A adesão é definida como um conjunto de fenômenos responsáveis pelo estabelecimento de conexões entre duas superfícies (COUVRAT, 1990). De acordo com Frihart e Hunt (2010), o adesivo é o principal responsável pela adesão da madeira, a qual está relacionada às características físico-químicas da madeira e do adesivo, assim como, o processo adotado para colagem (VICK, 1999). Portanto, a adesão é consequência da interação desenvolvida entre o contato molecular de dois materiais e suas forças superficiais de atração. Para uma boa adesão é fundamental que ocorra um contato íntimo e contínuo entre o adesivo e o substrato, fazendo com que o adesivo umidifique a superfície da madeira. Para que isto aconteça é necessária uma migração do adesivo para dentro da estrutura microscópica da parede celular (BIAZZON, 2016; GALEMBECK; GANDUR, 2001).

Dentre os fatores que afetam a estabilidade mecânica das juntas coladas podemos citar: a anatomia, a umidade da superfície da madeira, a força coesiva da linha de cola e a penetração do adesivo na madeira (SCHULTZ; NARDI, 2003). Follrich et al. (2010) descrevem ainda que uma boa penetração do adesivo depende principalmente do fluxo hidrodinâmico e da ação capilar sendo influenciado diretamente pela viscosidade, temperatura, formulação do adesivo (teor de sólidos e distribuição do peso molecular), espalhamento do adesivo, pressão aplicada e processos de usinagem, incluindo limpeza da superfície, danos estruturais e rugosidade.

Os fenômenos envolvidos nos processos de adesão podem ser explicados pela teoria da adesão mecânica, difusão de polímeros e adesão química (MARRA, 1992; ALBINO et al., 2010).

Teoria da adesão mecânica

A adesão mecânica resulta da penetração e endurecimento do adesivo dentro de cavidades, poros e asperezas da superfície da madeira (SCHULTZ; NARDIN 1994; ALBINO et al., 2010). De acordo com Gindl et al. (2005), é necessário que o adesivo penetre suficientemente no material para alcançar e ancorar as células intactas da madeira. A adesão mecânica entre o adesivo e a superfície da madeira vai depender, principalmente, da porosidade e aspereza da superfície, rugosidade, da viscosidade do adesivo, da pressão aplicada durante a montagem e da duração desse processo.

Alguns autores concordam que, a adesão mecânica existe, entretanto, argumentam que sua contribuição para adesão total é secundária e insustentável (PIZZI; MITTAL, 1994; SCHULTZ; NARDIN, 2003; ALLEN, 2005a, 2005b; de MOURA, 2006a, 2006b) em escala macroscópica. Entretanto, Allen (2005b) crítica a aplicação desta teoria à madeira e afirma que em escala microscópica, a adesão mecânica é vital. Uma boa penetração do adesivo é um fator de grande importância na colagem da madeira, pois proporciona uma melhor ancoragem mecânica do filme, devido o aumento da superfície efetiva de contato entre o revestimento e as paredes celulares (VICK, 1999; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006b; FRIHART; HUNT, 2010). De acordo com estudos realizados por Cool e Hernández (2011a), a penetração do adesivo é favorecida pela quantidade e pelo grau de preenchimento dos lúmens celulares.

Teoria da adesão por difusão de polímeros

A adesão da difusão de polímeros ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros à nível molecular pela interface, a qual permite uma absorção gradual através dos espaços formados pelas irregularidades, poros e cavidades na superfície do substrato. Esta teoria está associada com a penetração e a solidificação do adesivo (PIZZI; MITTAL, 1994).

Teoria da adesão química

A adesão química ocorre através de ligações primárias iônicas ou covalentes, e/ou por forças intermoleculares secundárias que acontecem entre o adesivo e o substrato (ALBINO et al., 2010). Esta teoria pode ser entendida como uma subdivisão da teoria da adsorção (PIZZI; MITTAL, 1994). As ligações químicas envolvidas neste fenômeno podem ser divididas em ligações primárias (ligações iônicas, covalentes e metálicas), ligações secundárias (forças de Van der Waals, forças dipolo-dipolo, dipolo permanente) e pontes de hidrogênio (BIAZZON, 2016). Desse modo, a adesão ocorre pelo contato molecular entre o adesivo e a madeira, gerando as forças de atrações superficiais (PIZZI; MITTAL, 1994; FRIHART; HUNT, 2010).

2.4.2 Revestimentos de acabamento superficial da madeira

Como qualquer material biológico, a madeira está sujeita à degradação causada pela umidade, pela radiação UV e pela oxidação (AUCLAIR, 2010). Os revestimentos de acabamento protegem a madeira da radiação solar, melhora a aparência visual e tátil e mantém a integridade mecânica das superfícies. Entre os principais revestimentos utilizados em madeiras estão as tintas e os vernizes.

As primeiras fábricas de tintas e vernizes ocorreram na Europa no final do século XVIII e início do século XIX. Mas, foi apenas no século XIX que houve o grande incremento dessas indústrias devido à necessidade de se utilizar tintas e vernizes não só para fins

artísticos, mas também, e, principalmente, para proteger os materiais (MARTINS, 2005). Em 1930, surgiram novas formulações de tintas, desenvolvidas a partir de resinas fenólicas, nitrocelulósicas e alquídicas. Estas formulações permitiram a obtenção de tintas brilhantes e duráveis, conhecidas como tintas de esmalte, utilizadas, principalmente, na pintura de exteriores e interiores e em quase todas as espécies de materiais de construção. O aparecimento dessas resinas e a expansão da indústria química, assim como o desenvolvimento da tecnologia de polímeros permitiram a diversificação dos tipos de tintas e vernizes produzidos industrialmente (MARTINS, 2005; SILVA, 2008). A partir da década de 1950, surgem as primeiras tintas a base de resinas sintéticas, as quais são dissolvidas em solvente orgânicos e se encontram dispersas ou emulsionadas em água, conhecida vulgarmente por tintas plásticas. Esta descoberta despertou um grande interesse devido ao fato deste tipo de tinta ser mais econômica, menos tóxica, segura e limpa após sua aplicação (SILVA, 2008). Atualmente procura-se substituir os solventes orgânicos pela água, a fim de se produzir tintas em pó visando proteger quem as aplica dos efeitos de toxicidade, bem como produzir tintas com um elevado teor de sólidos com o intuito de reduzir a utilização de produtos tóxicos (SILVA, 2008).

A tinta é definida como uma composição pigmentada líquida, pastosa ou sólida que, quando aplicada em camada fina sobre uma superfície apropriada, no estado em que é fornecida ou após fusão, diluição ou dispersão em produtos voláteis, é convertível ao fim de certo tempo numa película sólida, corada e opaca. O verniz, por sua vez, é definido como a composição não pigmentada, líquida, pastosa ou sólida que, quando aplicada em camada fina sobre uma superfície apropriada no estado em que é fornecida ou após diluição, é convertível ao fim de certo tempo, numa película sólida, contínua, transparente ou translúcida e mais ou menos dura (MARTINS, 2005; OLIVEIRA, 2008, SILVA, 2008).

Segundo Sousa (2004), a utilização de tintas e vernizes em uma superfície podem apresentar as seguintes finalidades:

- decoração – um dos aspectos mais importantes; altera o aspecto visual de qualquer superfície;
- proteção – a aplicação de um revestimento por pintura sobre uma superfície pode aumentar a sua durabilidade e contribuir assim para uma redução de custos de reparação e manutenção;
- limpeza e sanidade – as superfícies pintadas são, em geral, sedosas e muito pouco porosas de modo que é fácil limpá-las e mantê-las limpas;
- iluminação e eficiência – resultante, por exemplo, de aplicação de cores brancas ou claras permitindo melhorar a iluminação de recintos fechados ou diminuir o efeito cansativo da luz intensa;
- funções especiais – associadas às características especiais de resistência mecânica ou química, fornecidas por tintas que impeçam o desenvolvimento de microrganismos ou outros agentes de degradação.

Outro produto de acabamento encontrado é o stain. O stain consiste em um tingidor que colore a madeira, diferindo-se da tinta e do verniz devido ao fato de preservar as características naturais como grã e os anéis de crescimento (CRUMP, 1992). Tem como principal função a alta penetração da madeira, formando uma película fina, providos de filtro solar, impermeável, podendo ter ação preservativa, não apresenta problemas de trincas e a proteção ocorre por impregnação, ou seja, impedindo que a água entre no material por hidrorrepelência (FLÓREZ, 2016).

A qualidade de um revestimento pode ser determinada pela avaliação de suas propriedades tais como espessura da camada, adesão, aparência visual, cor, brilho, porosidade e resistência (UGULINO, 2016). Portanto, uma compreensão dos mecanismos de adesão é muito importante para entender e aumentar a durabilidade dos revestimentos (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005; HERNÁNDEZ; COOL, 2008; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016). De acordo com de Moura e Hernández (2005), uma boa adesão é alcançada através de uma boa molhabilidade entre o revestimento e a superfície da madeira. Esta propriedade resulta das forças de ligação que se estabelecem entre a película formada pelo revestimento e o substrato. Outro fator importante para assegurar uma boa aderência do revestimento é a penetração (UGULINO, 2016; COOL; HERNÁNDEZ, 2011a). Uma boa penetração leva a uma melhor ancoragem mecânica entre o revestimento e a parede celular da madeira (LIPTÁKOVÁ; KÚDELA, 1995; BURDULU et al., 2005; UGULINO, 2016).

A rugosidade da superfície da madeira apresenta um efeito significativo quanto a aplicação e vida útil dos acabamentos, este fato deve-se a área disponível para adesão ser afetada pelo nível de rugosidade que o substrato apresenta (HERNÁNDEZ; de MOURA, 2002; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005, 2006b). As operações de usinagem da madeira como aplainamento e lixamento alteram a rugosidade superficial do substrato e sua capacidade em receber um produto de acabamento. Hernández e Cool (2008) avaliaram as superfícies da madeira de *black spruce* após os processos de lixamento e aplainamento através de imagens microscópicas. Os autores constataram que para as superfícies lixadas haviam ranhuras típicas (fibras arrancadas e levantadas), produzidas pela ação do grão da lixa. Além disso, os lúmens celulares foram preenchidos pelo pó produzido durante o processo de lixamento diminuindo-se assim a adesão e a penetração do revestimento. Para as superfícies aplainadas, foram observados poucos danos nas células, apresentando relativamente maior quantidade de células com cavidades intactas, como vasos e fibras, facilitando-se assim a penetração do adesivo.

2.4.3 Principais componentes de tintas e vernizes

Pigmentos

Os pigmentos são substâncias sólidas, finamente divididas, praticamente insolúveis em água, solventes e ligantes, sendo usados na preparação de tintas com o objetivo de lhes conferir cor, textura e opacidade ou certas características especiais (SOUSA, 2004; OLIVEIRA, 2008; SILVA 2008). A natureza e o teor do pigmento são de extrema importância para tinta, pois são os únicos constituintes que conferem a opacidade ao material. Esta propriedade está intimamente relacionada com o respectivo índice de refração. Quanto maior a diferença entre o índice de refração do pigmento e do veículo, maior será a opacidade da tinta. Os pigmentos são ainda responsáveis por propriedades anticorrosivas, mecânicas, brilho, resistência à luz, resistência às intempéries, ação retardadora ao fogo, anti-condensação, resistência aos produtos químicos e ao envelhecimento do revestimento (SOUSA, 2004; OLIVEIRA, 2008). Os pigmentos podem ser classificados quanto à natureza química e quanto ao processo de obtenção. No que diz respeito à natureza química podem ser divididos em pigmentos orgânicos e inorgânicos; e quanto ao processo de obtenção, são classificados em pigmentos naturais e artificiais ou sintéticos.

Cargas

As cargas são minerais industriais, insolúveis nos veículos, que em geral não conferem opacidade às tintas, sendo o seu poder de corante muito fraco. As cargas servem apenas para dar espessura ao filme de tinta ou para simplesmente aumentar o volume da tinta. No entanto, determinadas cargas, em virtude da sua granulometria, da sua superfície específica e das suas características intrínsecas, facilitam a fabricação e aplicação das tintas, melhorando a sua qualidade e durabilidade, possibilitando a sua conservação e aumentando a impermeabilidade e a elasticidade (SOUSA, 2004; OLIVEIRA, 2008). Dentre as cargas mais utilizadas destacam-se: a argila, a sílica e os silicatos, a diatomite, o carbonato de cálcio, o talco e o óxido de zinco.

Veículo fixo (ligantes)

O ligante é o componente responsável pela formação da película seca contínua, pela adesão e dureza do filme depois de seco, pela resistência química, mecânica às condições climáticas (SOUSA, 2004; OLIVEIRA, 2008). Sua principal função é proteger a madeira da ação da água e dar flexibilidade ao produto. A formação da película pode ocorrer através de duas maneiras: física (evaporação do solvente) ou química (endurecimento como resultado de uma série de reações químicas). Os ligantes mais usados são os óleos secativos e as resinas. Atualmente, as resinas sintéticas são mais utilizadas na indústria de tintas e constituem compostos de alto peso molecular. As resinas sintéticas mais comuns são as alquídicas, de epoxy, de poliuretano, as acrílicas, de poliéster, as vinílicas e as nitrocelulósicas (OLIVEIRA, 2008; SILVA, 2008).

Veículo volátil (Solventes)

O veículo volátil é a parte líquida da tinta, constituída por solventes e diluentes, que permitem umedecer e transportar o pigmento. Definem-se solventes como líquidos voláteis nas condições normais de secagem, capazes de dissolver o veículo fixo de tintas e vernizes, e os diluentes como sendo líquidos voláteis, parcial ou totalmente miscíveis com o veículo, que adicionados a uma tinta ou verniz, durante o processo de fabricação ou no momento da aplicação, lhe reduzem a viscosidade. Os solventes mais utilizados para a proteção superficial da madeira é a água e os dissolventes orgânicos (SILVA, 2008).

2.4.4 Vernizes

Os vernizes consistem em uma película de acabamento utilizada em diversos materiais. Podem ser divididos em dois grupos: vernizes de fundo ou tapa-poros e os vernizes de cobertura. Os vernizes de fundo são utilizados como a primeira demão após a preparo da superfície da madeira; estes vernizes devem ser compatíveis com os vernizes de cobertura. Os vernizes de cobertura costumam ser mais brilhantes, de meio brilho ou mate.

Os vernizes podem ser ainda de dois tipos: monocomponentes os quais não necessitam de preparo antes da aplicação e bicomponentes resultando da mistura do verniz com um endurecedor em proporções determinadas (SOUSA, 2008). Os vernizes bicomponentes apresentam cura após a evaporação do solvente por reações químicas entre os vários componentes da mistura ou por contato com o ar. Atualmente, os vernizes à base de solvente têm sido substituídos pelos vernizes de base aquosa devido aos seus elevados teores de compostos orgânicos voláteis (COVs) que são prejudiciais ao meio ambiente e a saúde. Os

COVs são hidrocarbonetos que podem ser substituídos facilmente por oxigênio, enxofre, fósforo ou um halogênio e podem reagir com a luz solar ou simplesmente com outros compostos presentes na atmosfera ocasionando chuvas ácidas e nevoeiros fotoquímicos. Estes compostos podem ainda provocar graves danos à saúde (SOUSA, 2008). Por esta razão, há maior interesse nos vernizes de base aquosa, os quais vão apresentar baixos teores de COVs, sendo, menos agressivos ao meio ambiente e, portanto, mais ecológicos. Os vernizes de base aquosa ainda não lideram o mercado mundial devido ao seu alto custo em comparação com os vernizes a base de solventes, porém, este custo pode ser compensado pela redução de perdas durante a aplicação. A principal desvantagem do verniz de base aquosa é o levantamento das fibras da madeira. Uma forma de solucionar este problema é a redução do tempo de contato entre a aplicação do acabamento e a madeira visando ter tempo suficiente para que a água evapore do filme prevenindo-se assim certos defeitos (SOUSA, 2008).

O verniz ideal deve apresentar propriedades como flexibilidade, durabilidade, permeabilidade e eventual resistência à fungos. Existem diversos tipos de vernizes, de natureza química diferente, que proporcionam desempenhos diferentes à camada de acabamento. Os que mais se destacam são os vernizes à base de poliuretano, nitrocelulose e água.

Vernizes à base de poliuretano

Os vernizes à base de poliuretano são revestimentos que vão apresentar acabamentos de alta resistência à abrasão, dureza, durabilidade, resistência química, resistência térmica, umidade, teor de sólidos de aproximadamente 45%, transparência e alto brilho; entretanto, são muito sensíveis às mudanças climáticas principalmente à umidade e temperatura, apresentam uma cura lenta em relação a outros produtos e se forem de natureza aromática, o acabamento pode ter um amarelamento (ÇAKICIER et al., 2011). São formados por dois componentes que reagem entre si, dos quais um contém grupos reativos (catalisadores) – sua cura ocorre pela evaporação do solvente e a reação química entre os componentes é irreversível (CERCHIARI et al., 2010). Este acabamento pode ser usado tanto para ambientes internos quanto externos, sendo mais empregado para pisos. É considerado de difícil aplicação, não permitindo retoques de aplicação, exigindo maior treinamento do operador, além de ser caro (ÇAKICIER et al., 2011).

Vernizes à base de nitrocelulose

Os vernizes nitrocelulósicos são obtidos pela nitração, através da mistura com ácido nítrico e ácido sulfúrico, de algodão ou polpa de madeira (SENAI, 1995). São considerados reversíveis, pois podem retornar ao estado líquido depois de curados (CERCHIARI et al., 2010). Este verniz assegura um efeito muito mais flexível, gerando um acabamento de maior durabilidade. Pode ser classificado com alto brilho devido ao polimento. É um produto tóxico, inflamável, insolúvel em água, incolor e com odor característico. Quando comparado aos vernizes à base de poliuretano, são menos resistentes; e não recomenda-se misturar os acabamentos com base nitrocelulósica e produtos à base de poliuretano (LOSADA, 2011). O verniz à base de nitrocelulose apresenta ainda altas emissões de COVs, sendo, portanto, recomendado, sua substituição pelo verniz à base de água.

Vernizes à base de água

Os vernizes à base de água tem como principal solvente a água; apresenta baixa toxicidade, não sendo inflamável, podendo ainda promover a redução de poluentes no ar e adaptável às linhas de pintura (CRUMP, 1992; FAZENDA, 2005). Tem como desvantagens as limitações de demandar matérias primas específicas, pouca variedade de resinas e secagem mais demorada que os demais solventes (FAZENDA, 2005). O verniz à base água pode ser comparado aos demais vernizes conforme mostra a Tabela 4. A porcentagem de solventes orgânicos diminui drasticamente nos produtos à base água, entretanto, os teores de sólidos e de voláteis são similares para ambos os vernizes (GNECCO et al., 1989; FAZENDA, 2005).

Tabela 4. Comparativo entre os produtos convencionais e o verniz à base de água (FAZANO, 1989).

Propriedades	Tipo de verniz	
	Convencional	À base de água
Teor de sólidos (%)	30-35	35-40
Teor de voláteis (%)	65-70	60-65
Teor de solventes orgânicos (%)	100	7
Volume de vapor orgânico/100g de verniz	15,90 l/g	0,92 l/g
Solventes	Xilol-toluol, glicóis, acetato de butila	Água-glicóis, éteres de glicóis, alcoóis

CAPÍTULO I

EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA ALTERAÇÃO DA COR E NA INATIVAÇÃO DA SUPERFÍCIE EM MADEIRAS DE EUCALIPTO

EFFECT OF AGING ON COLOR CHANGE AND SURFACE INACTIVATION IN EUCALYPT WOODS

RESUMO

A inativação da superfície da madeira está relacionada à degradação físico-química, a qual é influenciada principalmente pelo teor e pela natureza dos extrativos, os quais, por sua vez, definem a cor da madeira. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tempo de envelhecimento na alteração da cor e na inativação da superfície e suas correlações em madeiras de eucalipto. Foram estudadas sete madeiras de eucalipto (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*) com 12 anos de idade. A densidade aparente foi determinada. As análises colorimétricas foram realizadas no espaço de cor $L^*a^*b^*$ CIE 1976. As medições de ângulo de contato foram realizadas com o analisador de formato da gota DSA 100 no modo estático. As medições de cor e ângulo de contato foram realizadas na superfície fresca (recém-usinada) e envelhecida após 7, 14, 21 e 28 dias. As madeiras foram classificadas em três classes de densidade: muito alta, alta e baixa; e dois grupos de cor: amareladas e avermelhadas. O envelhecimento das madeiras de eucalipto causou o escurecimento (menor luminosidade – L^*) e o aumento de cromaticidade na superfície. O ângulo de tonalidade (h_{ab}) da madeira de *Eucalyptus grandis* aumentou após o acondicionamento de 28 dias, indicando que sua superfície se tornou mais amarelada. A diferença de cor (ΔE^*_{ab}) após o armazenamento foi mais importante para as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus robusta*. O tempo de envelhecimento afetou a molhabilidade da superfície das madeiras de eucalipto, com o aumento do ângulo de contato em função do tempo de acondicionamento mostrando que as superfícies tornaram-se mais hidrofóbicas. A densidade da madeira teve um efeito importante na fase inicial da molhabilidade, afetando pouco o ângulo de contato ao longo do tempo. As variáveis L^* , a^* , b^* e C^*_{ab} tiveram maior impacto na molhabilidade da superfície que a densidade.

Palavras chaves: ângulo de contato, análise do formato da gota, espaço de cor $L^*a^*b^*$ CIE 1976.

ABSTRACT

The wood surface inactivation is related to physical-chemical degradation, which is influenced mainly by the content and nature of the extractives, and it defines the wood color. This study aimed to evaluate the effect of aging on the color change and surface inactivation and their correlations on the eucalypt woods. Seven eucalypt woods were studied (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, and *Eucalyptus grandis*) at the 12 years-old. The specific gravity was determined. Color analyzes were performed in the CIE 1976 L*a*b* space color. Contact angle measurements were performed with the drop shape analyzer DSA 100 in static mode. Color and contact angle measurements were performed on the fresh surface (freshly machined) and aged after 7, 14, 21 and 28 days. The woods were classified into three density classes: very high, high and low; and two groups of color: yellowish and reddish. The storage of eucalypt wood usually causes a darkening (lower luminosity - L*) and an increase of chromaticity in the surface. The hue angle (h_{ab}) of the *Eucalyptus grandis* wood increased after 28 days of storage time, indicating that its surface became more yellowish. The color difference (ΔE^*_{ab}) after storage was more important for the woods of *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita*, and *Eucalyptus robusta*. The storage time affected the wettability of the surface of the eucalypt wood, with the increase of the contact angle as a function of the storage time, showing that the surfaces became more hydrophobic. The density of the wood had an important effect in the initial phase of the wettability, affecting little the contact angle over time. The variables L*, a*, b* and C^*_{ab} had a greater impact on the wettability of the surface than the density.

Keywords: contact angle, drop shape analysis, CIE 1976 L*a*b* space color.

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal possui uma grande importância econômica para o Brasil, no qual destaca-se a produção e exportação de produtos oriundos de florestas plantadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017), a área de florestas plantadas é de 10 milhões de ha, com crescimento de 0,85% no setor entre 2015 e 2016, correspondendo a 91% da madeira produzida no país para fins industriais (IBÁ, 2017). Neste cenário, o gênero *Eucalyptus* desempenha um papel importante, principalmente por apresentar um rápido crescimento, atingido muitas vezes pelo melhoramento genético e pela clonagem. Esse gênero tem sido utilizado principalmente nas indústrias de papel, celulose e de painéis reconstituídos à base de madeira e para energia. Já o uso da madeira sólida de eucalipto no Brasil, apesar de crescente nos últimos anos, ainda é incipiente enquanto em países tais como Austrália, África do Sul, Chile e Argentina a sua utilização é comum para a produção de móveis (UNB/LPF, 2007). Sendo assim, é necessária a realização de estudos sobre suas propriedades tecnológicas e melhorias nos processos de secagem, usinagem, adesão e revestimentos de madeira.

A molhabilidade é a capacidade de um líquido de se espalhar sobre a superfície da madeira e o contato líquido-sólido é influenciado pela energia livre da superfície e pelas forças de coesão do líquido responsáveis pela tensão superficial (GRAY, 1992; LUZ et al., 2008). A molhabilidade da madeira é afetada principalmente pelas características intrínsecas de cada espécie – estrutura anatômica e química, densidade e umidade, as quais são dependentes de fatores edafoclimáticos; e pelas operações de usinagem. Os processos de secagem e usinagem assim como o envelhecimento da madeira causam a inativação natural da superfície (detrimento das suas propriedades). Os fatores responsáveis pela inativação são: a migração de extrativos hidrofóbicos para a superfície durante a secagem e, ou, armazenamento, resultando em uma baixa molhabilidade; a acidez dos extrativos (os quais afetam a adesão); a oxidação da superfície causada pelo envelhecimento; a reorientação molecular dos grupos funcionais da superfície; e o fechamento dos microporos da parede celular, o qual reduz a absorção por capilaridade na madeira (FPL, 2010). A oxidação da superfície da madeira recém-usinada ocorre assim que ela é exposta ao oxigênio contido na atmosfera. O aumento simultâneo na proporção de carbono com a diminuição do oxigênio faz com que a superfície se torne mais hidrofóbica afetando diretamente o processo de adesão (GINDL et al., 2004). Segundo alguns autores (VICK, 1999; AYDIN; COLAKOGLU, 2005), a inativação da superfície da madeira aumenta com o tempo de armazenamento, ocorrendo alterações de cor e redução de aderência. Portanto, há uma correlação ou dependência entre a alteração de cor, a inativação da superfície e a composição química, principalmente quanto ao teor e a natureza dos extrativos, a qual varia entre as espécies.

A análise de ângulo de contato é uma medida quantitativa da molhabilidade e permite estimar o grau de inativação da superfície quanto à molhagem e a penetração de um líquido (FRIHART; HUNT, 2010). Superfícies com ângulos de contato de 0° apresentam uma molhabilidade completa (superfície hidrofílica); ângulos $< 90^\circ$ caracterizam superfícies parcialmente molháveis; enquanto ângulos $> 90^\circ$ caracterizam superfícies completamente hidrofóbicas (não molhável) (WÄLINDER, 2000; LUZ et al., 2008; LATTHE et al., 2014). A determinação do ângulo de contato pode ser realizada no modo estático e dinâmico. No modo estático, a medição do ângulo de contato é feita pela deposição de uma gota na superfície do substrato em que o cosseno do ângulo de contato está relacionado à energia superficial da amostra e é calculado pela equação de Young (TSHABALALA, 2005). No modo dinâmico, o método da balança de Wilhelmy é mais conhecido em que o ângulo de contato é determinado com o uso de uma balança de precisão, que mede a força exercida sobre uma pequena amostra de perímetro conhecido, quando ela é mergulhada e retirada de um líquido com tensão

superficial conhecida (TSHABALALA, 2005). Um dos métodos mais recentes de medição de ângulo de contato é o analisador de formato da gota (*Drop Shape Analyzer – DSA*) que permite calcular o ângulo estático e dinâmico; e mensurar a energia superficial de sólidos e a tensão superficial de líquidos (KRÜSS, 2011).

A cor da madeira é uma propriedade organoléptica de muita importância, tendo uma enorme influência no valor comercial das madeiras. As madeiras mais valiosas sempre apresentaram cores distintas, desenhos agradáveis e boa textura (CSANÁDY et al., 2015). A cor depende principalmente dos componentes químicos presentes na estrutura da madeira e da microtopografia da superfície ocasionada pela usinagem ou outros tratamentos. A reação dos componentes da madeira à luz, calor, umidade e outros produtos químicos pode alterar a sua cor (CSANÁDY et al., 2015). As principais substâncias estruturais da madeira, celulose e hemicelulose não absorvem a luz visível. Entretanto, a lignina absorve e reflete a luz abaixo do comprimento de onda de 500 nm e apresenta uma coloração amarelo pálido. Em geral, esta cor é típica do alburno de quase todas as espécies de madeira, e a medida que o alburno se transforma em cerne, suas cavidades são preenchidas com extrativos incluindo terpenos, polifenóis, resinas, taninos, açúcares e ácido gordurosos (CSANÁDY et al., 2015).

Todas as madeiras passam por um processo de envelhecimento natural que pode ser definido como uma mudança irreversível nas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas durante o armazenamento ou uso prolongado, a qual influencia diretamente a qualidade da superfície da madeira (KRÁNITZ et al., 2016). As alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira devido ao envelhecimento ocorrem através das modificações na microestrutura devido a modificação química dos componentes da madeira (KRÁNITZ et al., 2016). O tipo de alteração química que ocorre na superfície, assim como sua intensidade no processo de envelhecimento natural é influenciado principalmente pelas condições às quais o material é exposto e ao tempo de armazenamento (KRÁNITZ et al., 2016). A alteração de cor é, portanto, um dos primeiros indícios dessas modificações.

A fotodegradação é um processo que causa alteração de cor na madeira em condições naturais em que as modificações químicas e a profundidade de penetração da luz dependem principalmente do comprimento de onda. Quando a madeira é exposta à luz solar direta, danos severos são induzidos pela radiação ultravioleta (UV) (KRÁNITZ et al., 2016). No caso das madeiras armazenadas em ambientes fechados, os espectros de luz solar são absorvidos por vidros de janelas e portas, resultando em uma baixa intensidade de radiação UV, além disso, podemos ainda ter a influência da presença de luz artificial e a oxidação da superfície. A combinação destes efeitos leva ao envelhecimento natural da superfície da madeira resultando em uma coloração mais acinzentada, amarelada ou avermelhada ao longo prazo. A intensidade da alteração de cor é alta no início do envelhecimento e tende a diminuir e se estabilizar com o tempo (MIKLECIC et al., 2011; 2012). Segundo alguns autores (MATSUO et al., 2011; SONDEREGGER et al., 2015; KRÁNITZ et al., 2016), o aumento do tempo de armazenamento (envelhecimento) causa uma redução na luminosidade da madeira e um aumento na cromaticidade, entretanto, esse comportamento pode variar de uma espécie a outra.

Devido ao potencial de utilização da madeira sólida de eucalipto, alguns estudos foram realizados visando avaliar a qualidade da superfície madeira (SILVA et al., 2005, 2007, 2009; SOUZA et al., 2009; PALERMO et al., 2014, 2015). Entretanto, não foram encontrados na literatura estudos abordando a correlação entre a alteração de cor e a inativação da superfície em função do tempo de acondicionamento em madeiras de eucalipto. Sendo assim, este estudo visou testar as seguintes hipóteses: (i) o envelhecimento altera a cor e inativa a superfície da madeira de espécies de eucalipto; e (ii) há correlação entre a alteração de cor e a inativação da superfície, a qual é dependente da espécie.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tempo de envelhecimento na alteração da cor e na inativação da superfície e suas correlações em madeiras de eucalipto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Foram estudadas as madeiras de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Eucalyptus pellita* F. Muell, *Eucalyptus robusta* Sm., *Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (Família: Myrtaceae) (Figura 18). O material foi proveniente de árvores de 12 anos de idade, coletadas de um plantio da empresa florestal Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA S.A., situada no município de Guanhães, Minas Gerais (latitude: 18° 46' 16" S; longitude: 42° 55' 55" O; e altitude: 744 m). Amostras tangenciais do cerne com dimensões de 150 x 35 x 20 mm (comprimento x largura x espessura) foram obtidas de uma ou duas toras por espécie. As amostras foram aplainadas em uma das faces e acondicionadas em câmara climática a 20°C e 65% de umidade relativa (UR) até obtenção de peso constante. Durante o acondicionamento das amostras, foram utilizadas micro prensas visando restringir as deformações decorrentes do processo de secagem. A umidade das amostras após o envelhecimento foi de aproximadamente 12%.

A densidade aparente das madeiras foi determinada de acordo com as especificações da ASTM D 2395-93 (1999). Após o acondicionamento, a superfície das amostras foram raspadas manualmente com uma lâmina da marca JUNG AG (Heidelberg, Alemanha) a fim de produzir uma superfície fresca, condição inicial para as análises de cor e de ângulo de contato.

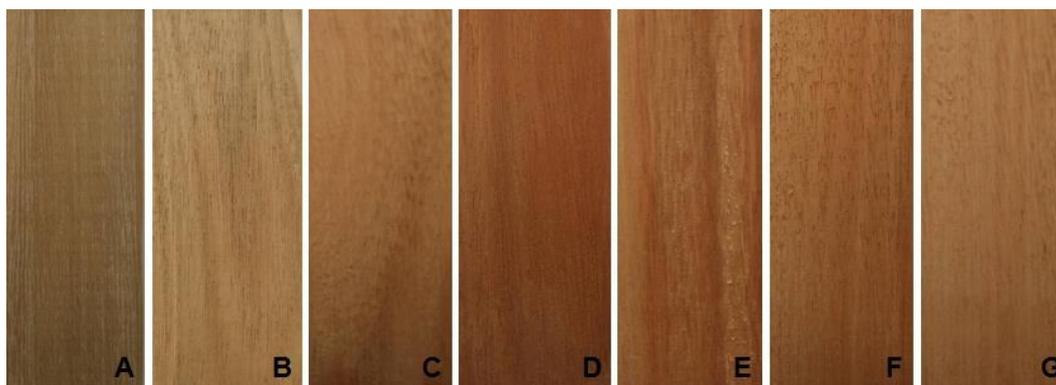


Figura 18. Aspecto visual das madeiras de eucalipto. (A) *Corymbia citriodora*. (B) *Eucalyptus camaldulensis*. (C) *Eucalyptus pellita*. (D) *Eucalyptus robusta*. (E) *Eucalyptus saligna*. (F) *Eucalyptus urophylla*. (G) *Eucalyptus grandis*.

2.2 Espectroscopia da cor da madeira

As análises colorimétricas foram realizadas com o espectrofotômetro CM 2600d da Konica Minolta no espaço de cor $L^*a^*b^*$ CIE 1976 segundo a norma ISO 11664-4 (2008), em que foram obtidas as variáveis: luminosidade (L^*) variando do preto (zero) ao branco absoluto (100); coordenadas cromáticas a^* [variando de verde ($-a^*$) a vermelho ($+a^*$)] e b^* [variando de azul ($-b^*$) ao amarelo ($+b^*$)] em uma escala de +60 a -60; croma (C^*_{ab}), variando de 0 (acromático) à 60; e ângulo de tonalidade (h_{ab}), o qual inicia-se no eixo $+a^*$ em que 0° representa o vermelho, 90° o amarelo, 180° o verde e 270° o azul (Figura 19). Os parâmetros C^*_{ab} e h_{ab} foram calculadas pelas equações (5) e (6).

$$C^*_{ab} = \left[(a^*)^2 + (b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (6)$$

As medições de cor foram efetuadas na face tangencial em 10 pontos equidistantes ao longo do comprimento da amostra utilizando o iluminante D65, ângulo de observação de 10°, luz especular incluída e abertura de 3 mm («*Small Area View*» SAV). Foram realizadas medições na superfície fresca (recém-usinada) e envelhecida após 7, 14, 21 e 28 dias. Foram utilizadas 15 repetições para cada espécie. Os dados foram transferidos para o *software* SpectraMagic™ NX (CM-S100w), versão 1.9, da Konica Minolta e transportado para o *software* Microsoft Office Excel para as análises estatísticas. Antes e após as medições de cor, as amostras foram mantidas em câmara climática (20°C e 65% UR) sem nenhuma proteção da superfície da madeira. Entre os intervalos das medições, as amostras foram mantidas em câmara climática em condições controladas de temperatura e umidade.

A diferença de cor (ΔE^*_{ab}) entre a superfície fresca e as superfícies envelhecidas após 7, 14, 21 e 28 dias de acondicionamento também foi calculada pela equação (7):

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (7)$$

em que: ΔL^* , Δa^* e Δb^* = diferença entre os respectivos valores das coordenadas L^* , a^* e b^* da superfície fresca e envelhecida após 7, 14, 21 e 28 dias.

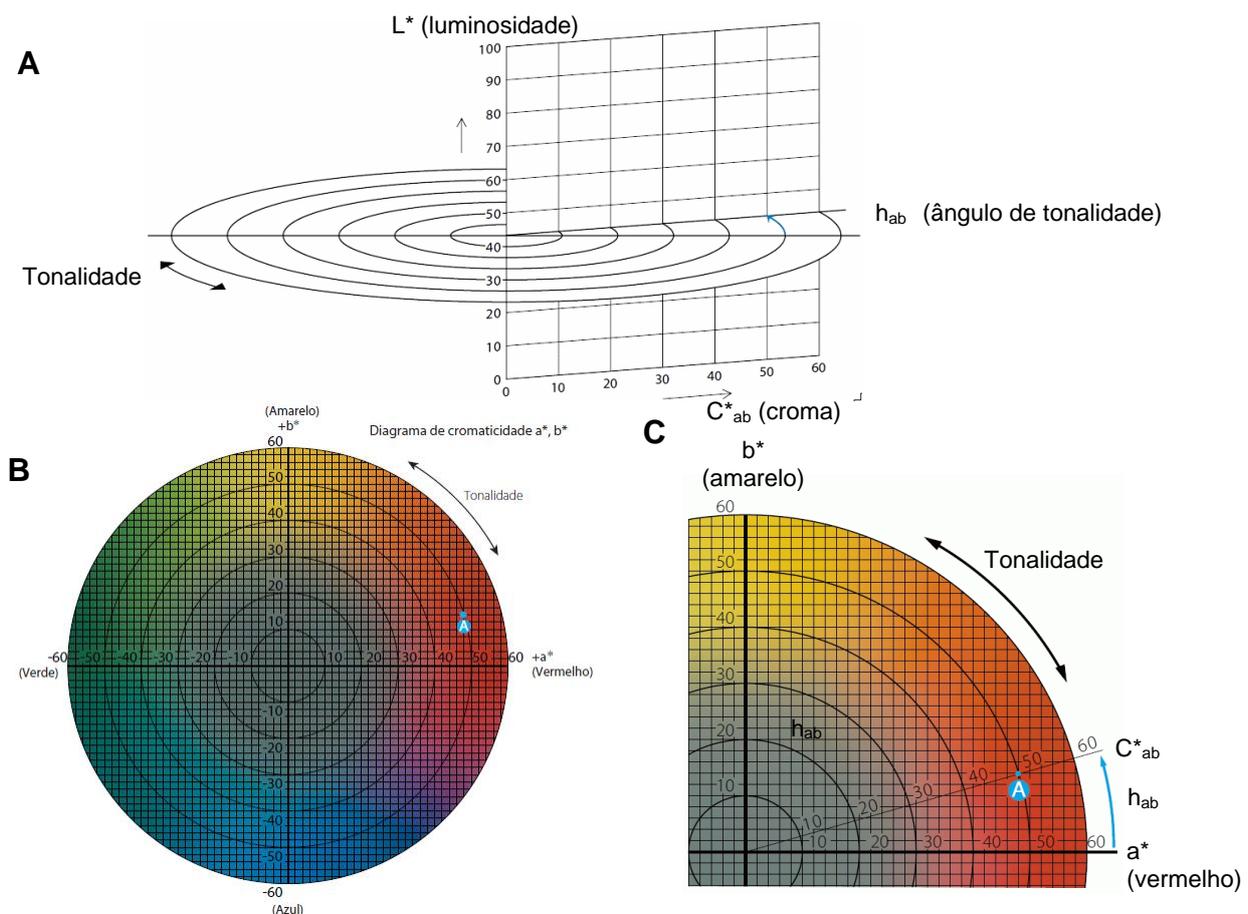


Figura 19. (A) Croma e luminosidade. (B) Diagrama de cromaticidade a^* , b^* . (C) Parte do diagrama de cromaticidade (KONICA MINOLTA, 1998).

2.3 Análises de ângulo de contato

A molhabilidade da superfície das amostras das madeiras foi avaliada pela análise de ângulo de contato com o analisador de formato da gota (*Drop Shape Analyzer DSA100*), versão 1.92 da KRÜSS GmbH (Hamburg, Alemanha). O equipamento é composto por uma mesa para suporte das amostras, uma seringa dosadora e um sistema de vídeo com câmera (Figura 20) para aquisição de imagens da gota. As medições de ângulo de contato foram realizadas pelo programa DSA1, o qual captura imagens da gota depositada na superfície do material e calcula o ângulo de contato de forma contínua ao longo do tempo de medição.

As medições foram realizadas em ambiente climatizado em que se utilizou água destilada como líquido teste, uma seringa dosadora de 100 μl , agulha com 0,5 mm de diâmetro e a altura da agulha em relação à superfície do material de 3 mm. O formato da gota foi analisado de forma contínua durante 120 s com medições a cada 5 s, resultando em 24 leituras de ângulo de contato para cada ponto de cada amostra. As medições de ângulo de contato foram efetuadas em cinco pontos de cada amostra com 15 repetições por espécie. As medições foram feitas na superfície fresca e repetidas na superfície envelhecida após 7, 14, 21 e 28 dias de acondicionamento. Foram escolhidos diferentes pontos de medição na superfície entre os intervalos de medição já que a gota altera a rugosidade da superfície.

Para as análises estatísticas, foram consideradas as seguintes variáveis de ângulo: ângulo de contato inicial = primeira leitura tomada 5 s após a deposição da gota na superfície da amostra; ângulo de contato final = última leitura tomada 120 s após a deposição da gota na superfície da amostra; e ângulo de contato médio = média das 24 leituras tomadas durante os 120 s de medição.

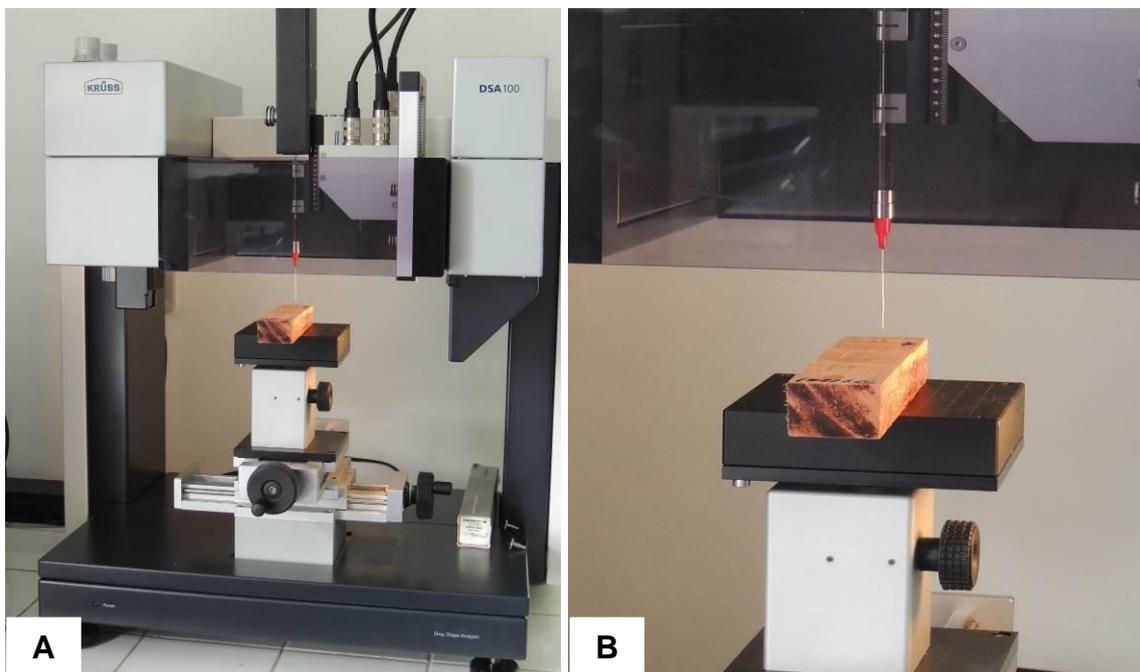


Figura 20. (A) Aspecto geral do sistema de análise de formato da gota DSA 100 (KRÜSS GmbH, Hamburg, Alemanha) utilizado para as medições de ângulo de contato. (B) Mesa suporte com amostra de eucalipto.

2.4 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas com o programa STATISTICA 7.0. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene à 95% de probabilidade. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) para as variáveis que atenderam os pressupostos da análise estatística e os testes de Tukey ou Fisher à 95% de probabilidade para a comparação entre as médias. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi utilizado para as variáveis que não atenderam os pressupostos da ANOVA. O teste de Dun foi utilizado para a obtenção das diferenças entre as médias

As variáveis dependentes estudadas foram: (i) cor = L* (luminosidade), a* (vermelho), b* (amarelo), C*_{ab} (croma), h_{ab} (ângulo de tonalidade) e ΔE^*_{ab} (diferença de cor); e (ii) ângulo de contato = ângulo de contato inicial (após 5 s), ângulo de contato final (após 120 s) e ângulo de contato médio (média de 24 leituras) para cada condição da superfície (fresca e envelhecida após 7, 14, 21 e 28 dias de acondicionamento) das sete madeiras de eucalipto.

A correlação entre as variáveis dependentes foi verificada pelas análises de Pearson.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização física e colorimétrica da madeira

A densidade aparente das madeiras variaram significativamente entre si (Tabela 5), sendo possível separar as mesmas em três classes (baixa, alta e muito alta). A madeira de *Corymbia citriodora* apresentou a maior densidade aparente, classificada como muito alta (BORTOLETTO JÚNIOR, 2003; STURION et al., 1987; FOELKEL, 1975) enquanto a madeira de *Eucalyptus grandis* apresentou a menor densidade (classe baixa). As densidades dessas madeiras estão de acordo com aquelas encontradas por outros autores, os quais mencionam densidades aparentes de 1,04 e 0,50 g.cm⁻³ (a 15% de umidade) para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus grandis* (IPT, 2003); e densidades básicas entre 0,47 e 0,49 g.cm⁻³ para a madeira de *Eucalyptus grandis* com idades entre 10 e 25 anos (ELEOTÉRIO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2010; SILVA, 2002). As densidades aparentes das demais madeiras (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla*) não se diferenciaram entre si, sendo classificadas como alta (BORTOLETTO JÚNIOR, 2003; RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993; FERREIRA; KAGEYAMA, 1978; FOELKEL, 1978), mas diferenciaram significativamente das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus grandis*.

As variáveis colorimétricas variaram significativamente entre as madeiras estudadas (Tabela 5). A luminosidade (L*) foi maior nas madeiras de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus grandis*, mostrando que elas apresentam cor mais clara quando comparadas às demais espécies. As madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla* são as mais escuras (menor valor de L*).

Tabela 5. Médias de densidade aparente e das variáveis colorimétricas das madeiras de eucalipto.

Espécies	Densidade aparente à 12%U (g.cm ³)	L*	a*	b*	C* _{ab}	h _{ab}
<i>Corymbia citriodora</i>	0,951 a (0,04)	68,54 c [474,42]	6,35 e [82,37]	20,70 b [455,74]	21,66 d [178,86]	72,98 a [971,53]
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,749 b (0,08)	72,59 a [788,83]	8,61 d [219,13]	20,94 a [515,32]	22,66 cd [277,13]	67,70 b [829,47]
<i>Eucalyptus pellita</i>	0,741 b (0,66)	70,10 b [593,89]	14,78 b [700,60]	21,96 a [739,13]	26,48 a [793,68]	56,09 c [527,40]
<i>Eucalyptus robusta</i>	0,758 b (0,06)	65,93 e [259,67]	15,22 a [824,20]	20,72 b [662,16]	25,72 ab [706,63]	53,76 d [234,06]
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,703 b (0,08)	67,23 cd [381,77]	14,96 ab [726,64]	20,67 b [450,74]	25,83 b [680,09]	54,15 d [269,25]
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,712 b (0,08)	66,64 de [317,57]	14,64 b [688,38]	21,39 a [713,21]	26,25 ab [739,49]	55,64 c [459,33]
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,460 c (0,03)	73,25 a [862,36]	13,06 c [437,18]	18,72 c [142,68]	22,83 c [302,02]	55,13 c [387,46]
Teste de Levene	1,59 ^{NS}	11,15*	6,79*	11,41*	7,91*	16,96*
ANOVA – Valor de F	70,13*	-	-	-	-	-
Teste de Kruskal-Wallis – Valor H	-	529,56*	790,90*	418,75*	662,08	759,02

Variáveis dependentes: L* = luminosidade, a* = vermelho, b* = amarelo, C*_{ab} = croma e h*_{ab} = ângulo de tonalidade. *Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} Não significativo. Valores entre parêntesis = desvio padrão. Valores entre colchetes = média dos postos de Kruskal-Wallis. Dentro da mesma coluna = Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

A tonalidade vermelha (a^*) variou significativamente entre as madeiras de eucalipto (Tabela 5). As madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna* apresentaram os maiores valores de tonalidade vermelha (a^*) enquanto a madeira de *Corymbia citriodora* apresentou os menores valores de a^* . As madeiras de *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla* apresentaram a mesma tonalidade vermelha com valores médios de a^* de 14,96, 14,70 e 14,78, respectivamente.

As madeiras de *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus urophylla* apresentam os maiores valores médios de b^* (amarelo) (Tabela 5). A madeira de *Eucalyptus grandis* apresentou o menor valor médio de b^* . As madeiras de *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla* apresentaram os maiores valores de croma (C^*_{ab}) enquanto as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus grandis* apresentaram os menores valores.

As madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis* apresentaram os maiores ângulos de tonalidade (h_{ab}) se aproximando mais do eixo b^* no diagrama de cromaticidade (Figura 19) indicando que elas apresentam uma cor mais amarelada quando comparadas às demais. As madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna* apresentaram os menores ângulos de tonalidade, ou seja, maior proximidade do eixo vermelho, caracterizando a cor mais avermelhada dessas espécies (Tabela 5). Em madeiras com valores de $a^* > 10$, a tonalidade vermelha manifesta-se de forma mais pronunciada que a amarela (b^*), predominando a nuance vermelha na formação da cor (ATAYDE et al., 2011; COSTA et al., 2011; GONÇALEZ et al., 2001). Sendo assim, obtém-se dois grupos de madeiras em termo de cor: madeiras amareladas (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis*) e madeiras avermelhadas (*Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*). Esses resultados corroboram com aqueles encontrados por Garcia et al. (2014) no qual foi observado uma alta luminosidade ($L^* > 67$) e baixa cromaticidade para a madeira de *Corymbia citriodora*; e por Muñiz (2002) que classificou as madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna* em tons variando de pardo-avermelhado a vermelho.

3.2 Efeito do tempo de envelhecimento na alteração da cor da madeira

O tempo de envelhecimento afetou significativamente a luminosidade das madeiras, exceto para o *Eucalyptus saligna* (Tabela 6). Entretanto, o comportamento de L^* variou entre as espécies após o envelhecimento (Figura 21). Para as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla*, L^* diminuiu gradativamente caracterizando o escurecimento dessas madeiras após o envelhecimento dado pelo acondicionamento. Nas madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus robusta* houve uma redução gradativa de L^* em função do tempo de acondicionamento, com um escurecimento significativo a partir de 21 dias. Para a madeira de *Eucalyptus urophylla* diferenças significativas em L^* foram observadas somente após 28 dias. O comportamento de L^* foi diferente nas madeiras de *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus grandis*. Nas madeiras de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*, L^* diminuiu após 21 dias e aumentou após 28 dias, não diferindo, nessa condição (28 dias), da superfície fresca. No *Eucalyptus grandis*, L^* diminuiu após 7 dias, aumentando em seguida e não diferindo da superfície fresca.

O escurecimento em madeiras de eucalipto causado pelo envelhecimento foi também observado por outros autores. Cademartori et al. (2015) avaliaram o efeito da exposição ao ar livre durante 360 dias na alteração de cor das madeiras de *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* e encontraram uma redução na luminosidade (L^*) nos primeiros

120 dias de exposição, estabilizando entre 240 a 360 dias, conferindo-lhes uma coloração acinzentada.

Tabela 6. Análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de H – Kruskal-Wallis) para avaliar o efeito do tempo de envelhecimento nas variáveis colorimétricas das madeiras de eucalipto.

Espécies	L*	a*	b*	C* _{ab}	h _{ab}	ΔE* _{ab}
<i>Corymbia citriodora</i>	2,81*	4,07*	4,76*	4,60*	[11,08]*	1,60 ^{NS}
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	[8,58]*	2,12 ^{NS}	6,68*	6,41*	0,40 ^{NS}	0,34 ^{NS}
<i>Eucalyptus pellita</i>	9,97*	13,98*	16,45*	16,16*	[15,91]*	6,48*
<i>Eucalyptus robusta</i>	4,20**	14,50*	16,09*	33,07**	0,67 ^{NS}	3,89*
<i>Eucalyptus saligna</i>	2,44 ^{NS}	1,16 ^{NS}	0,69 ^{NS}	2,28 ^{NS}	0,37 ^{NS}	1,26 ^{NS}
<i>Eucalyptus urophylla</i>	2,61*	4,33*	19,78*	13,72*	1,61 ^{NS}	4,38*
<i>Eucalyptus grandis</i>	6,61**	0,49 ^{NS}	[12,96]*	1,36 ^{NS}	2,39*	1,30 ^{NS}

Variáveis dependentes: L* = luminosidade, a* = vermelho, b* = amarelo, C*_{ab} = croma, h*_{ab} = ângulo de tonalidade e ΔE*_{ab} = diferença de cor. *Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} Não significativo. Valores entre colchetes = valor H obtido pelo teste de Kruskal-Wallis.

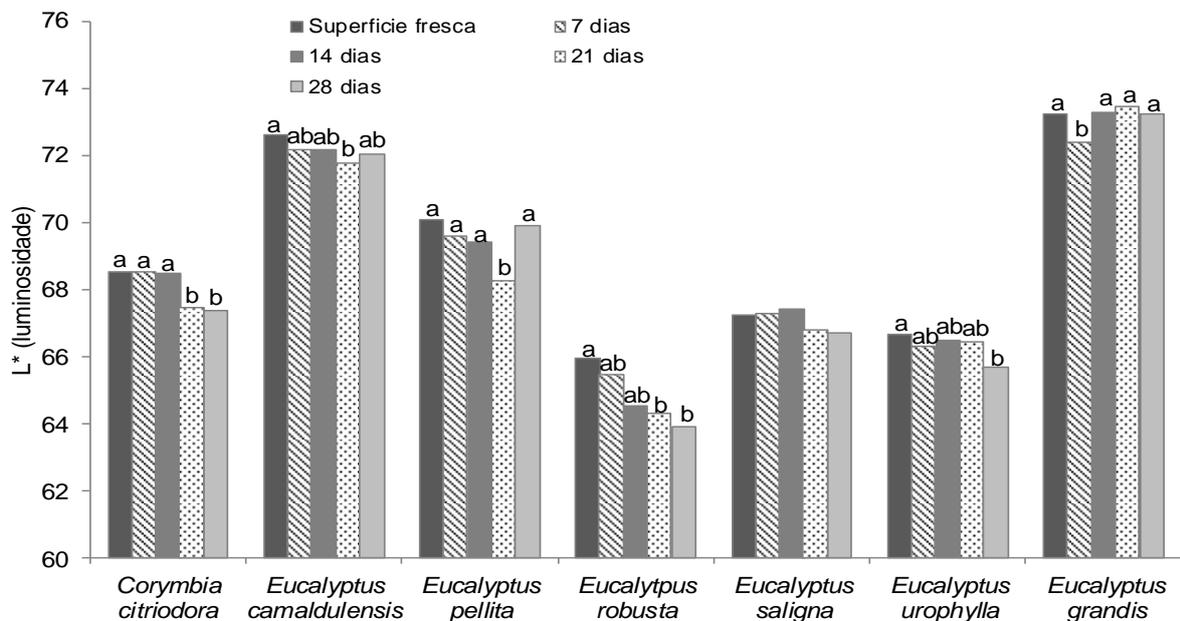


Figura 21. Efeito do tempo de envelhecimento na luminosidade (L*) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

O tempo de envelhecimento também apresentou um efeito significativo nas variáveis cromáticas a* (vermelho) e b* (amarelo) causando um aumento na tonalidade vermelha (a*) das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla* após 28 dias (Figura 22). Entretanto, o envelhecimento não afetou a* nas madeiras de *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. Já na coordenada b* (amarelo), houve um aumento significativo nas madeiras de eucalipto após 28 dias, exceto para o *Eucalyptus saligna* (Figura 23). Isto indica que, o tempo de armazenamento aumenta a cromaticidade da madeira.

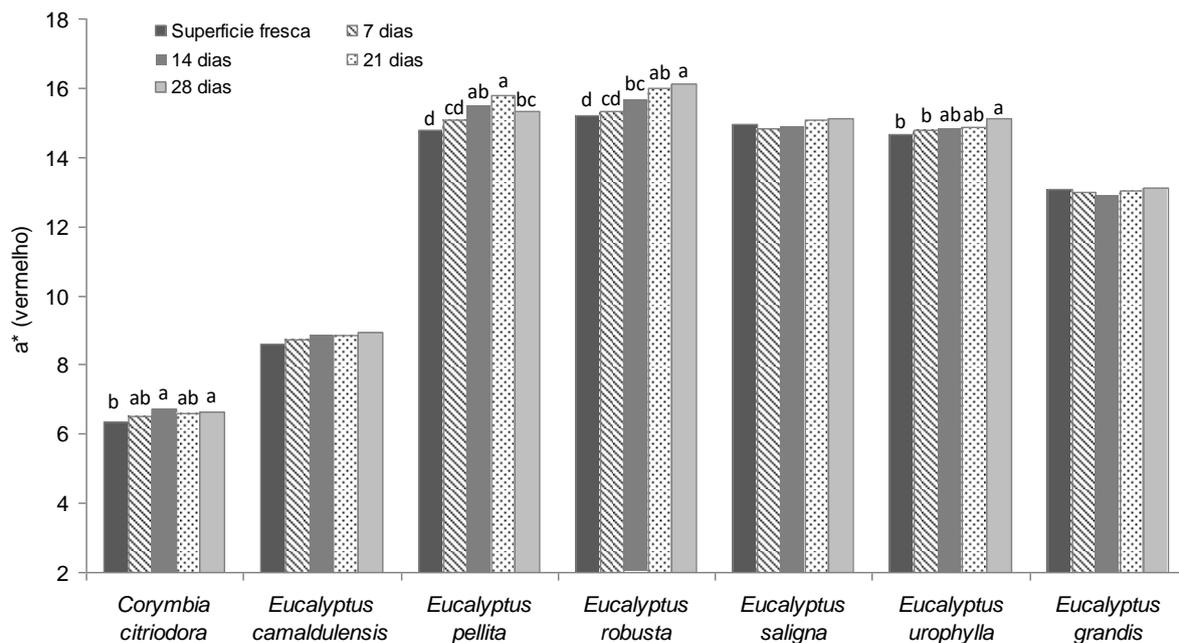


Figura 22. Efeito do tempo de envelhecimento na tonalidade vermelha (a^*) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

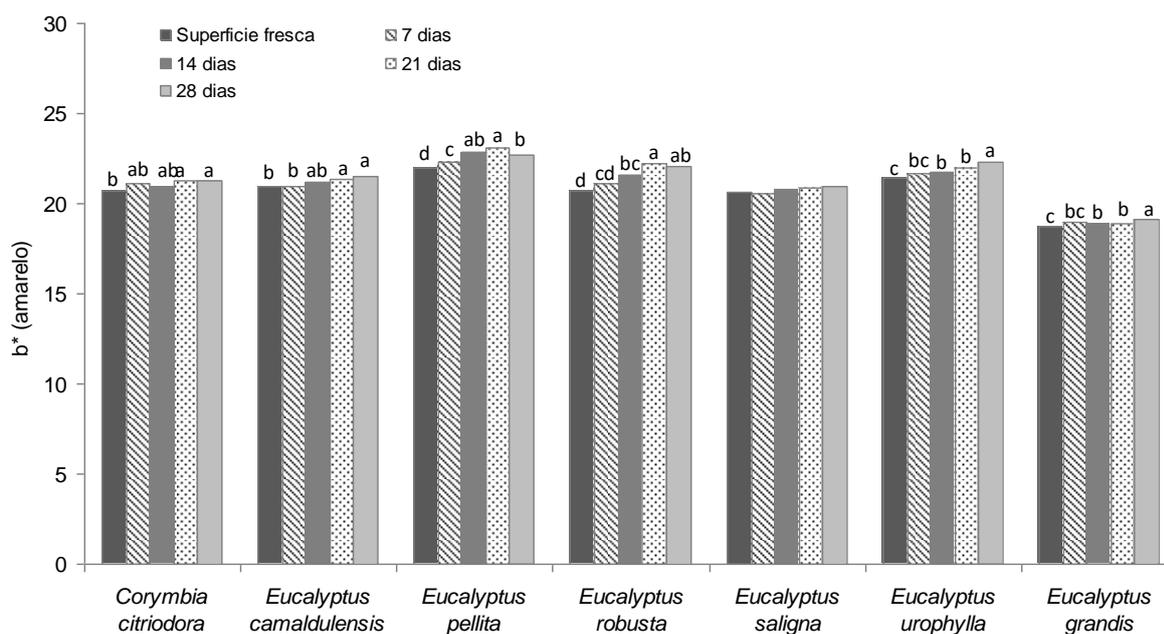


Figura 23. Efeito do tempo de envelhecimento na tonalidade amarela (b^*) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

O croma (C^*_{ab}) indica a saturação da cor, quanto maior o valor de C^*_{ab} mais saturada será a cor. O tempo de envelhecimento afetou o C^*_{ab} das madeiras, com exceção das espécies *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* (Tabela 6). Para as demais espécies foi evidenciada uma cromaticidade ou uma maior saturação após 28 dias (Figura 24). A cromaticidade (C^*_{ab}) é influenciada pelas coordenadas a^* e b^* , dessa forma à medida que estas duas variáveis

aumentam os valores de C^*_{ab} também aumentam. O aumento de C^*_{ab} evidencia um aumento nos pigmentos vermelho e amarelo, indicando maior saturação da cor (ATAYDE et al., 2011).

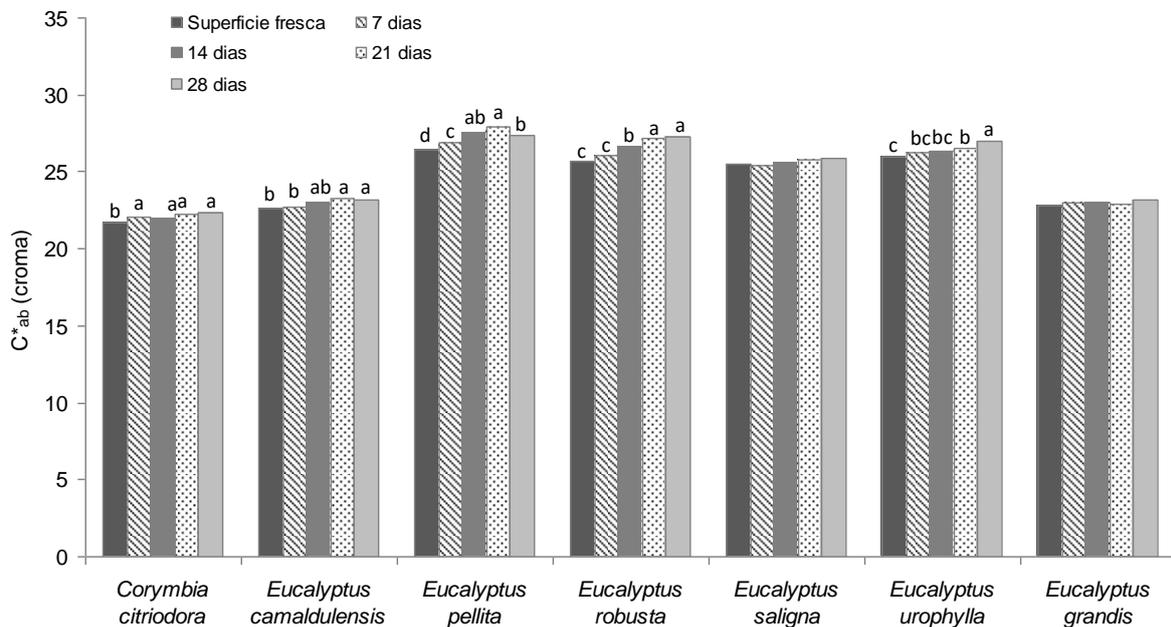


Figura 24. Efeito do tempo de envelhecimento no croma (C^*_{ab}) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

O tempo de armazenamento afetou o ângulo de tonalidade (h_{ab}) das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus grandis*, não sendo encontradas diferenças significativas para as demais espécies (Figura 25). Na madeira de *Eucalyptus pellita*, houve um aumento de h_{ab} após 21 dias quando comparada à superfície fresca, enquanto no *Eucalyptus grandis*, o h_{ab} foi menor na superfície fresca quando comparado às superfícies envelhecidas (exceto para o intervalo de 14 dias).

Somente as madeiras de *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla* apresentaram diferenças significativas no ΔE^*_{ab} entre os intervalos de dias (Tabela 6). Entretanto, todos os valores de ΔE^*_{ab} de todas as madeiras foram superiores a 1,5 (Figura 26). Segundo a classificação de Hikita et al. (2001), a qual se baseia em níveis de percepção de cor a partir de faixas de valores para ΔE^*_{ab} , madeiras com ΔE^*_{ab} entre 1,5 e 3 apresentam uma alteração notável de cor enquanto ΔE^*_{ab} entre 3 e 6 apresentam uma alteração apreciável. Sendo assim, as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus robusta* apresentaram as maiores alterações perceptíveis de cor (Figura 26).

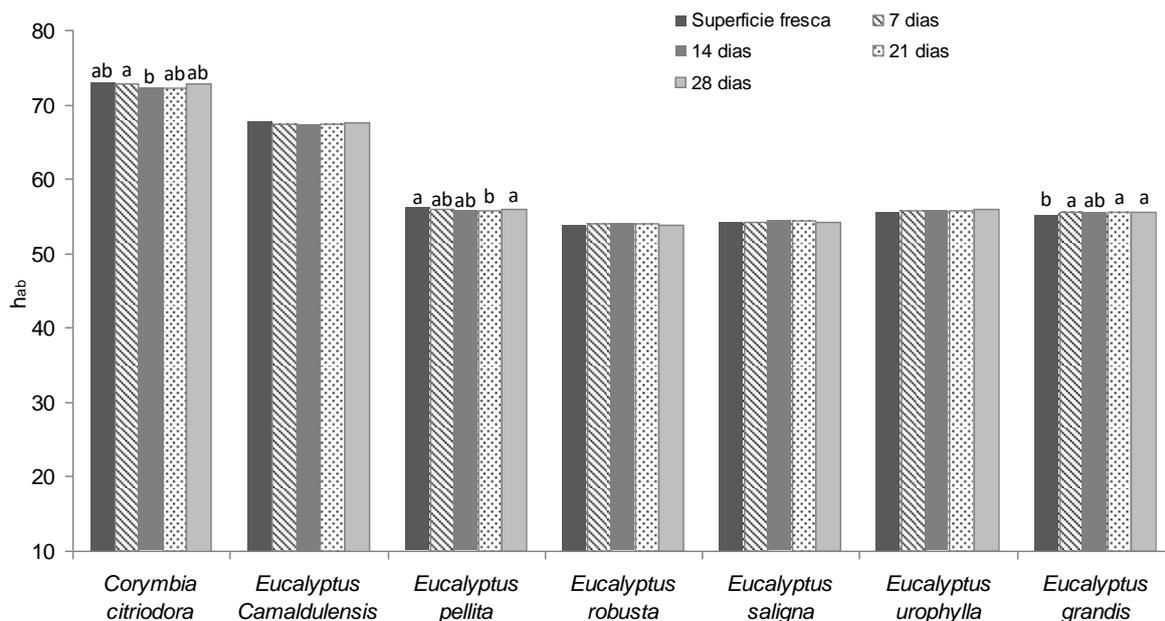


Figura 25. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de tonalidade (h_{ab}) da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

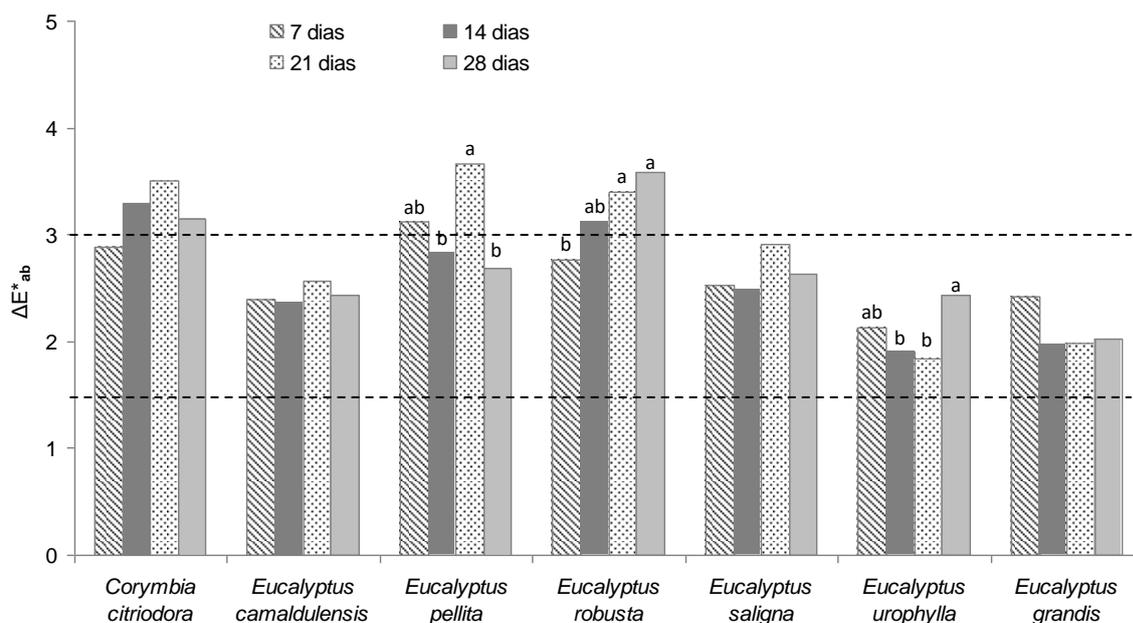


Figura 26. Efeito do tempo de envelhecimento na diferença de cor (ΔE^*_{ab}) da superfície das madeiras de eucalipto. Linhas pontilhadas representam as classes de percepção da alteração da cor: valores entre 1,5 e 3,0 = notável e $> 3,0$ = apreciável (HIKITA et al., 2001). Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

As alterações de cor na madeira após o envelhecimento podem ser explicadas pelo teor e natureza dos extrativos presentes na parede celular, os quais também são responsáveis pela caracterização da cor da madeira. Estes são compostos químicos de baixo peso molecular, geralmente formado por terpenos, óleos essenciais, ácidos graxos, álcoois, resinas, ceras, taninos, graxas e corantes, polifenóis, flavonóides, estilbenos, quinonas, entre outros

(HILLIS, 1989; BARRICHELLO; BRITO, 1985). Estudos realizados com as madeiras de *Larix decicua* (GIERLINGER et al., 2004) e de *Tectona grandis* (MOYA; BERROCAL, 2010) mostraram que a tonalidade vermelha (a*) e a luminosidade (L*) estão relacionadas a presença dos extrativos, enquanto o amarelo (b*) está relacionado principalmente com a fotoquímica dos principais componentes da madeira, especialmente a lignina. Costa et al. (2011) estudaram o efeito da fotodegradação nas madeiras de jatobá (*Hymenaea courbaril*) e de tauari (*Couratari oblongifolia*) causada pela radiação ultravioleta (UV) nas variáveis colorimétricas. Essas espécies apresentaram um escurecimento e um aumento na cromaticidade com o tempo de exposição a radiação UV em que a cor da madeira de jatobá tornou-se mais avermelhada passando de marrom avermelhado para vermelho escuro enquanto a madeira de tauari tornou-se mais amarelada passando de oliva-amarelado para marrom oliva (COSTA et al., 2011).

Martins et al. (2011b) ao estudarem os processos de fotodegradação da cor das madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus caribaea* através de ensaios de envelhecimento acelerado observaram um escurecimento das espécies com o aumento da radiação. Esse escurecimento foi evidenciado pela diminuição dos valores de luminosidade (L*) e pelo aumento da tonalidade vermelha (a*) e amarela (b*) Os autores afirmam ainda que as maiores alterações de cor ocorrem nas primeiras horas de radiação UV.

3.3 Efeito do tempo de envelhecimento na inativação da superfície da madeira

O envelhecimento afetou significativamente o ângulo de contato da superfície das madeiras de eucalipto (Tabela 7). O tempo de armazenamento causou um aumento significativo nos ângulos de contato (inicial, médio e final) para todas as espécies de eucalipto, indicando que as superfícies, tornaram-se mais hidrofóbicas, ou seja, apresentaram menor molhabilidade em função do tempo de envelhecimento (Figura 27).

Tabela 7. Resultado das análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de H – Kruskal-Wallis) para avaliar o efeito do tempo de envelhecimento na inativação da superfície de madeiras de eucalipto.

Espécies	Ângulo inicial	Ângulo final	Ângulo médio
<i>Corymbia citriodora</i>	4,22*	1,67 ^{NS}	2,44*
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	14,70*	[16,83]*	5,21*
<i>Eucalyptus pellita</i>	10,71*	4,58*	6,44*
<i>Eucalyptus robusta</i>	[35,29]*	4,39*	4,90*
<i>Eucalyptus saligna</i>	[65,50]*	5,26*	8,44*
<i>Eucalyptus urophylla</i>	[49,53]*	4,72*	[4,72]*
<i>Eucalyptus grandis</i>	30,69*	12,09*	16,72*

*Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} Não significativo. Valores entre colchetes = valor H obtido pelo teste de Kruskal-Wallis.

Na madeira de *Corymbia citriodora*, apesar do tempo de envelhecimento apresentar um efeito significativo nos ângulos inicial e médio, o mesmo não afetou o ângulo final (Tabela 7). O ângulo inicial na madeira de *Corymbia citriodora* apresentou um aumento significativo após 21 dias quando comparado à superfície fresca, já o ângulo médio aumentou significativamente após 14 dias (Figuras 28 e 30).

No *Eucalyptus camaldulensis* ocorreu um aumento gradual do ângulo inicial após 7-14 dias armazenamento, estabilizando-se após o período de 14 dias (Figura 28). O mesmo

comportamento foi observado para o ângulo inicial na superfície das madeiras de *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla*.

Os ângulos de contato final e médio do *Eucalyptus camaldulensis* aumentaram gradualmente em função do tempo de envelhecimento, entretanto, foram observadas diferenças significativas somente após 14 e 28 dias, respectivamente, quando comparado aos respectivos ângulos da superfície fresca (Figuras 29-30).

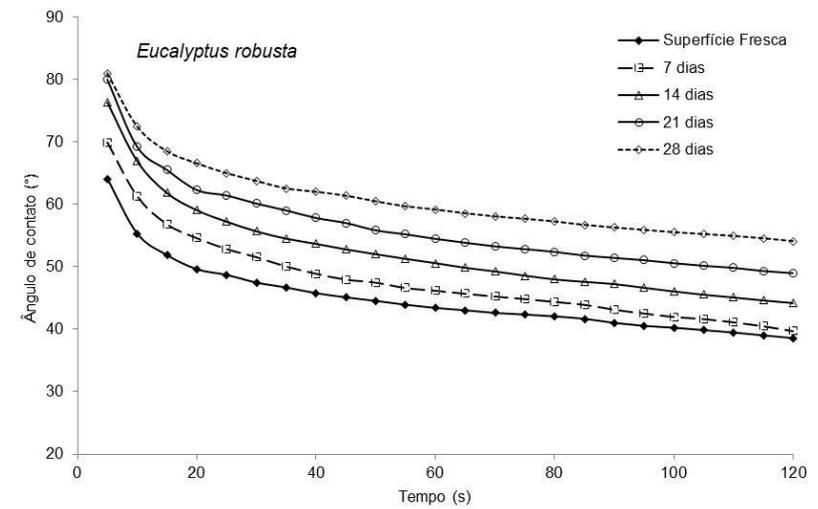
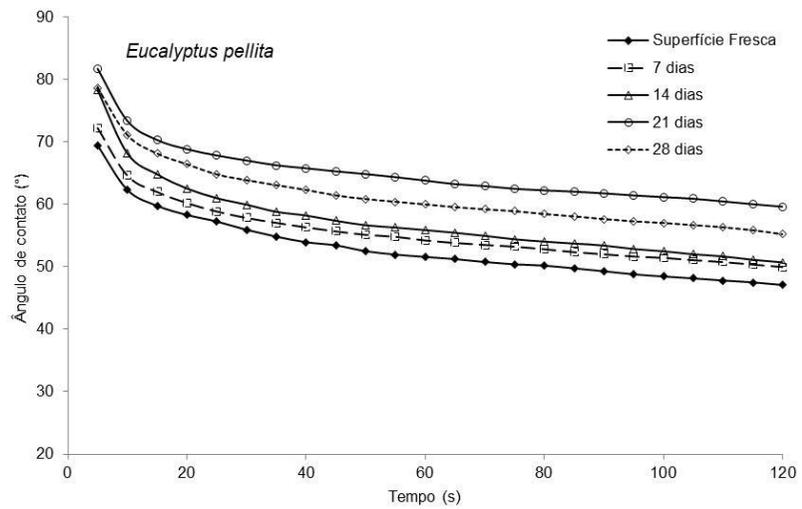
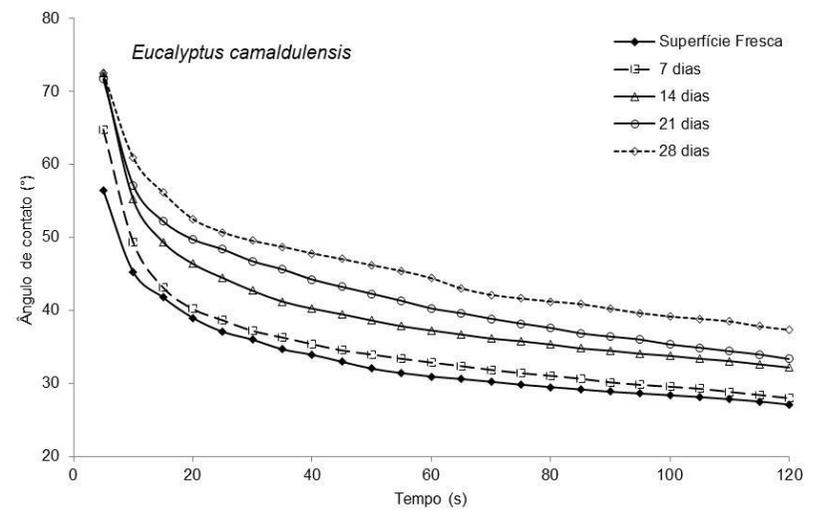
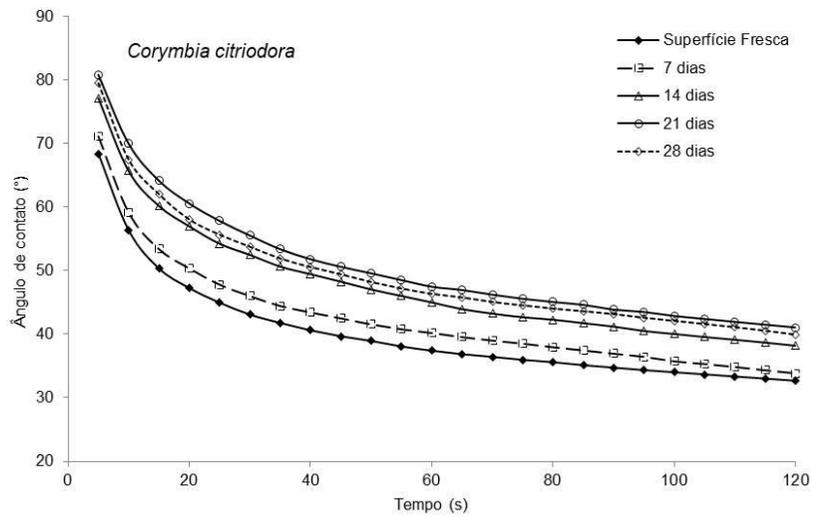
Nas madeiras de *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus urophylla*, o ângulo final aumentou significativamente após 21 e 14 dias, respectivamente (Figura 29), enquanto o ângulo de contato médio aumentou significativamente após 14 e 21 dias para as respectivas espécies (Figura 30).

Na madeira de *Eucalyptus robusta*, o ângulo inicial apresentou diferenças significativas após 14 dias quando comparado aquele da superfície fresca, enquanto os ângulos final e médio mostraram diferenças significativas somente após 28 dias. Nas madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*, o ângulo inicial aumentou significativo após 7 dias e o ângulo final após 21 dias, enquanto o ângulo médio aumentou a partir de 21 e 14 dias para as respectivas espécies (Figuras 28-30).

De acordo com os resultados encontrados na literatura (NUSSBAUM, 1996, 1999; NYLUND et al., 1998; NUSSBAUM; STERLEY, 2002; GINDL et al., 2004; SANTONI; PIZZO, 2011), o ângulo de contato aumenta em função do tempo de armazenamento, portanto, a molhabilidade da superfície da madeira diminui. A menor molhabilidade da superfície envelhecida pode ser explicada pela migração de extrativos que causam sua inativação (PIAO et al., 2010). De acordo com Sjöström (1993) e Gutiérrez et al. (2001), os extrativos mais hidrofóbicos (lipofílicos) são os principais responsáveis pela inativação da superfície. Segundo Frihart e Hunt (2010), a interferência química na superfície da madeira ocasiona uma redução na molhabilidade, podendo estar associada a fenômenos naturais (migração de extrativos), alteração involuntária (secagem excessiva) ou alteração intencional (modificação da madeira).

Os resultados mostraram que as madeiras de *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus urophylla* apresentaram a menor molhabilidade (maiores valores de ângulo inicial, final e médio); as madeiras de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus grandis* apresentaram a maior molhabilidade (menores valores de ângulo de ângulo); enquanto as demais espécies apresentaram um comportamento intermediário entre as madeiras com superfícies mais molháveis e menos molháveis (Tabela 8). As madeiras de eucalipto estudadas apresentam diferenças importantes em relação ao teor de extrativos totais com 13,89% para o *Eucalyptus camaldulensis*, 10,12% para o *Corymbia citriodora*, 9,06% para o *Eucalyptus saligna*, 7,78% para o *Eucalyptus urophylla*, 7,36% para o *Eucalyptus robusta*, 7,79% para o *Eucalyptus pellita* e 4,54% para o *Eucalyptus grandis* (MEDEIROS NETO, 2017).

A madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, apesar de apresentar o maior teor de extrativos totais (13,89%) quando comparado às demais espécies estudadas, mostrou uma alta molhabilidade e comportamento similar ao do *Eucalyptus grandis* (madeira de baixa densidade e com baixo teor de extrativos). Isso sugere que a natureza ou composição química dos extrativos apresenta um efeito mais importante na molhabilidade que o teor de extrativos. Gardner et al. (1995) relatam que os extrativos têm um efeito relevante na molhabilidade da madeira e que, devido a sua complexidade e composição, alguns deles quando presentes na interface da mesma (extrativos-líquido) podem direcionar o seu grupo funcional hidrofílico para o grupo polar do líquido, estabelecendo ligações químicas e causando uma alteração aparente na tensão superficial do líquido ou na tensão interfacial líquido-madeira, levando a diminuição ou ao aumento da energia superficial da madeira, e conseqüentemente, conferindo uma maior ou menor molhabilidade.



Continuação na página seguinte...

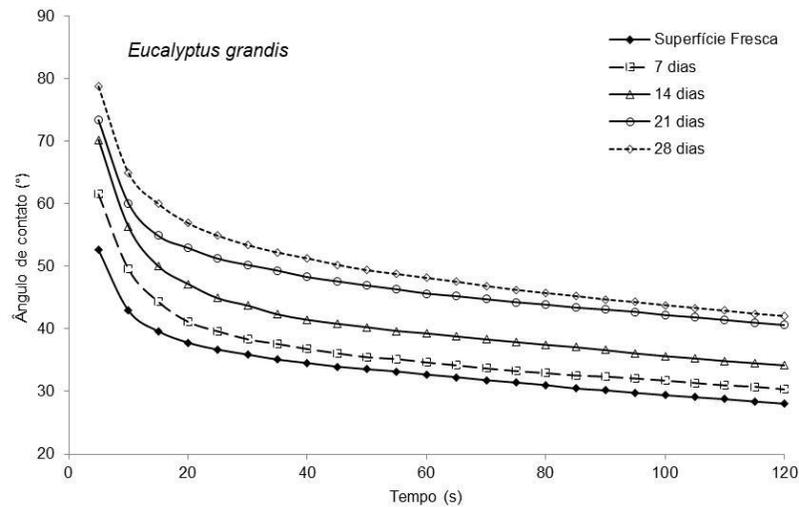
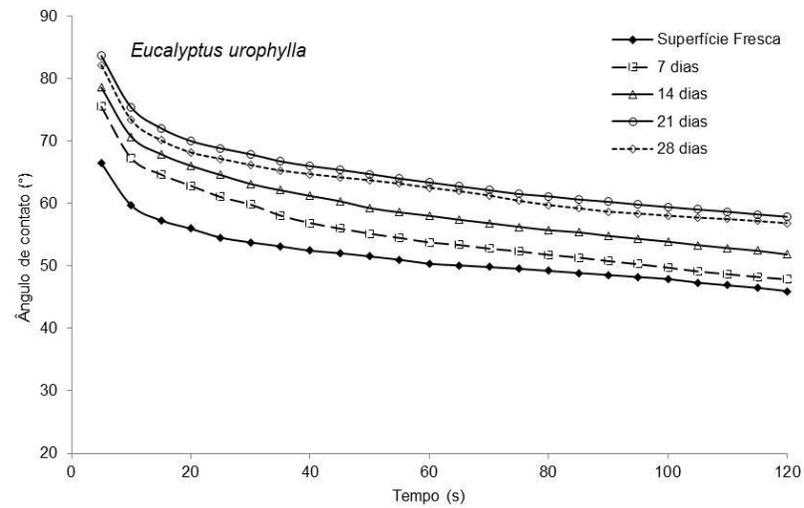
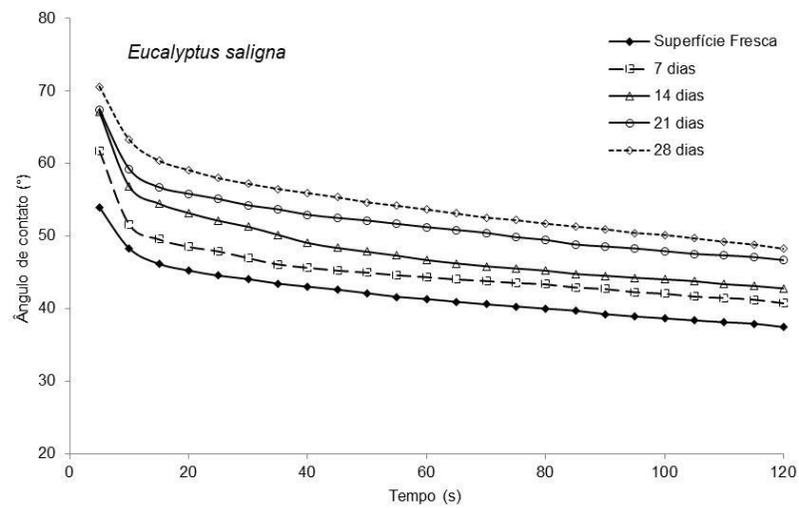


Figura 27. Comportamento do ângulo de contato da superfície das madeiras de eucalipto em função do tempo de medição.

Tabela 8. Médias e desvio padrão dos ângulos de contato da superfície das madeiras de eucalipto para a superfície fresca e envelhecida.

Espécies	Ângulo de contato inicial (°)					Ângulo de contato final (°)					Ângulo de contato médio (°)				
	Superfície fresca	Superfície envelhecida				Superfície fresca	Superfície envelhecida				Superfície fresca	Superfície envelhecida			
		7 dias	14 dias	21 dias	28 dias		7 dias	14 dias	21 dias	28 dias		7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
<i>Corymbia citriodora</i>	69,62b (11,76)	73,16ab (10,37)	76,33ab (12,37)	79,84a (10,66)	79,11a (11,49)	33,39 (12,23)	34,69 (12,91)	38,75 (13,78)	39,81 (12,74)	39,75 (12,27)	41,02b (12,94)	43,52ab (13,33)	48,04a (13,81)	49,42a (12,29)	48,92a (12,77)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	56,73c (9,94)	65,54b (10,57)	72,58a (10,50)	71,58ab (9,56)	72,46a (7,96)	28,20c [57,83]	28,94bc [59,85]	32,31abc [77,40]	32,99ab [8,20]	35,41a [92,75]	33,70b (9,18)	35,82b (10,70)	39,96ab (12,48)	41,97ab (8,01)	44,64a (12,44)
<i>Eucalyptus pellita</i>	69,64b (7,54)	72,19b (10,37)	77,99a (8,42)	81,42a (6,95)	78,44a (6,78)	47,96b (10,62)	50,40b (11,08)	51,09b (13,45)	59,53a (10,93)	55,56ab (12,65)	53,59c (8,95)	55,01bc (10,61)	56,18bc (10,83)	64,54ab (8,67)	61,41a (10,75)
<i>Eucalyptus robusta</i>	64,29c [43,33]	70,04bc [60,45]	76,33ab [81,75]	79,66a [93,60]	81,10a [100,06]	39,08b (14,65)	41,68b (15,74)	43,82ab (13,74)	47,92ab (15,89)	53,02a (11,97)	45,41b (14,41)	49,04b (14,08)	51,70ab (14,64)	55,33ab (14,92)	59,84a (11,31)
<i>Eucalyptus saligna</i>	53,91c [32,05]	61,69b [64,78]	67,07ab [86,03]	67,37ab [89,35]	70,44a [106,76]	36,93c (11,51)	40,73bc (10,54)	41,94abc (9,98)	46,67ab (10,24)	47,02a (8,49)	40,91b (11,11)	45,30ab (10,18)	47,54ab (9,34)	51,78a (9,41)	53,38a (7,09)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	66,41c [37,33]	74,34bc [61,03]	78,38ab [75,77]	83,61a [104,87]	82,87a [100,19]	51,42b [51,57]	53,98b [57,10]	58,76ab [78,27]	64,56a [99,63]	62,41a [92,87]	46,59b (14,61)	48,43b (12,21)	52,05ab (9,40)	57,28a (10,45)	55,71a (10,38)
<i>Eucalyptus grandis</i>	52,57d (8,25)	63,09c (8,78)	70,20b (11,52)	73,37ab (10,37)	78,37a (10,51)	28,03b (8,21)	31,51b (8,05)	33,64b (8,46)	41,12a (12,33)	42,28a (11,00)	33,71c (8,88)	36,92bc (7,26)	40,93b (8,95)	47,82a (11,50)	50,46a (10,57)

Valores entre parêntesis = desvio padrão. Valores entre colchetes = média dos postos de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si entre linhas.

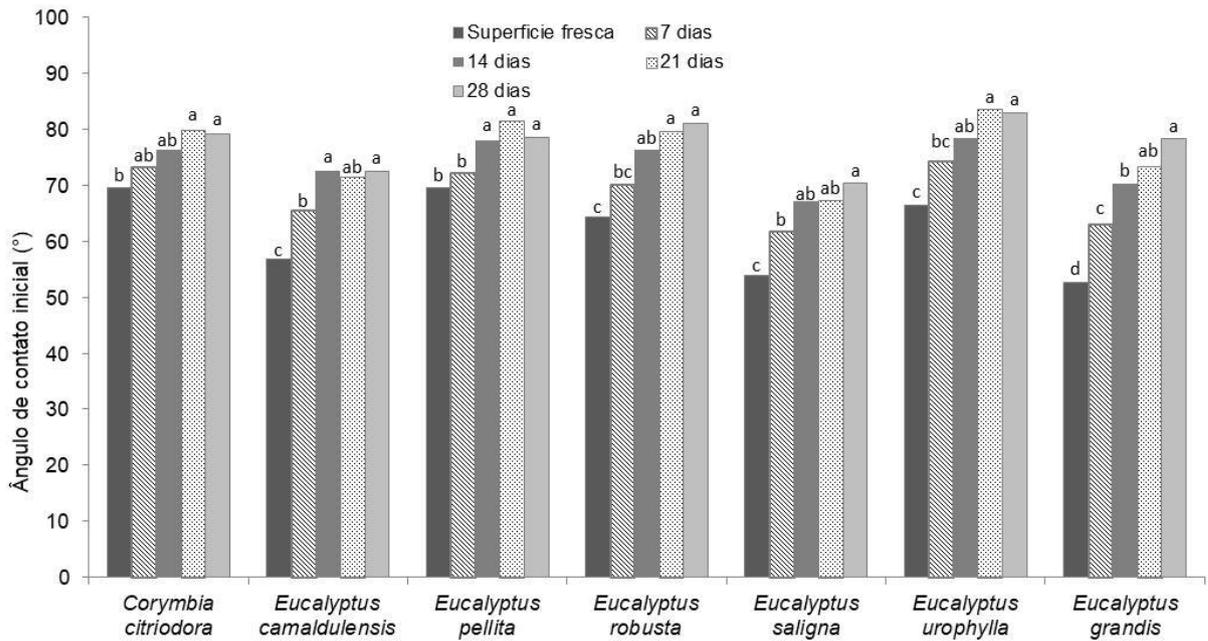


Figura 28. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de contato inicial da superfície das madeiras de eucalypto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

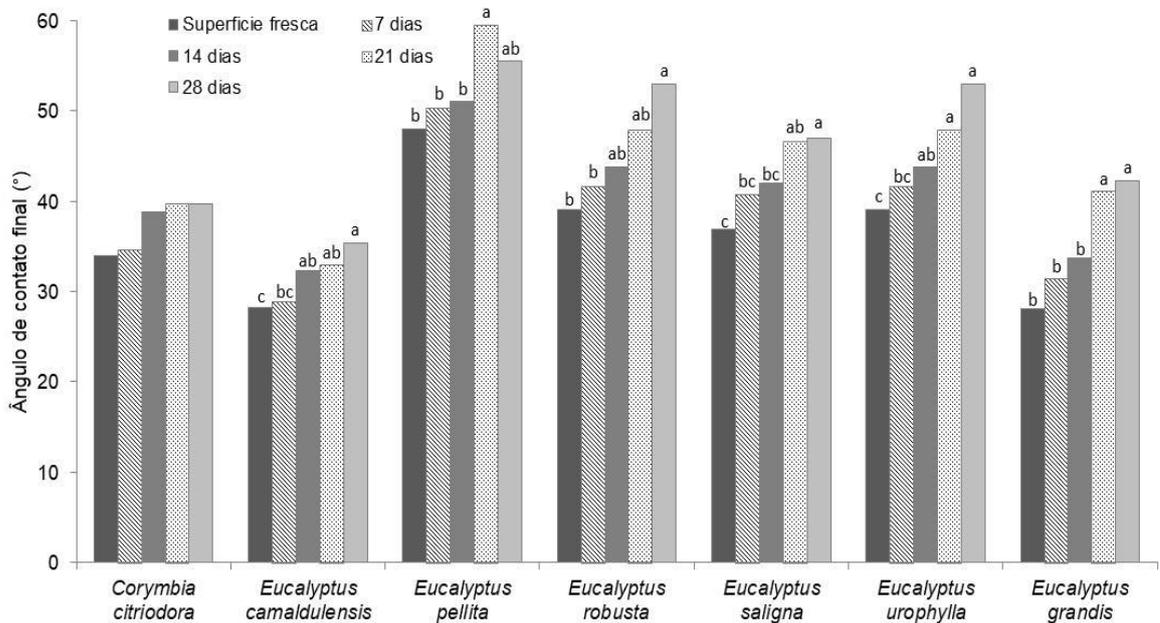


Figura 29. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de contato final da superfície das madeiras de eucalypto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

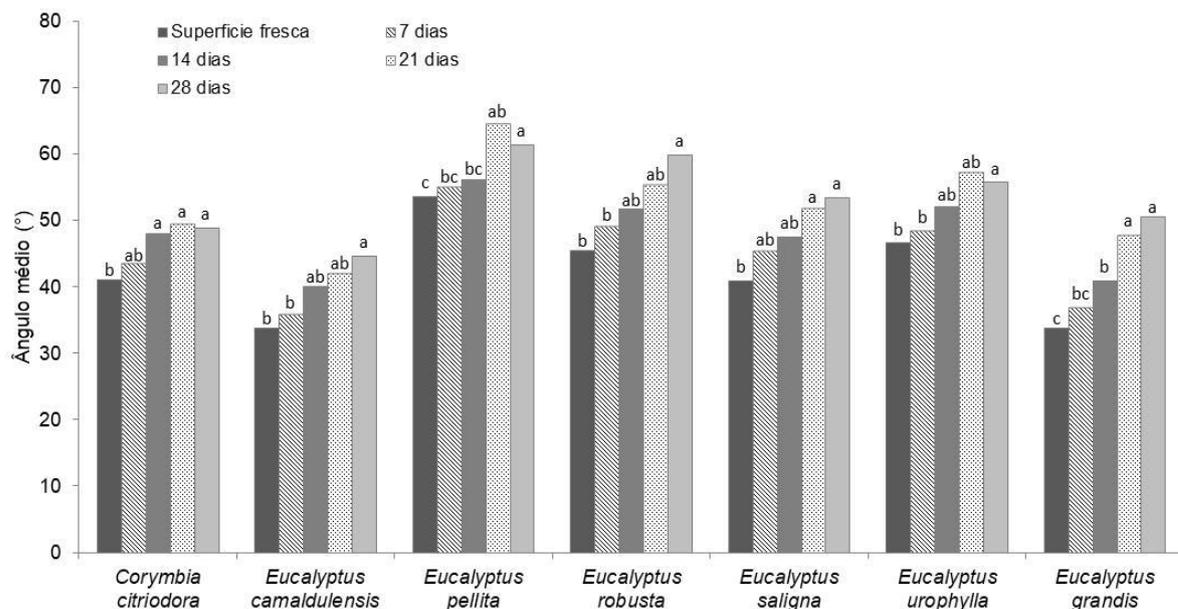


Figura 30. Efeito do tempo de envelhecimento no ângulo de contato médio da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

3.4 Correlação entre densidade, cor e ângulo de contato

As análises mostraram uma correlação significativa da densidade com as variáveis colorimétricas (exceto C^*_{ab}) e todas as variáveis de ângulo de contato na superfície fresca, embora essas correlações tenham sido baixas (Tabela 9).

A correlação entre densidade e L^* indica que as madeiras mais densas tendem a apresentar cores mais escuras (menores valores de L^*). Por exemplo, *Eucalyptus grandis* apresentou a menor densidade aparente e maior luminosidade (Tabela 9). A densidade apresentou uma correlação significativa e negativa com a tonalidade vermelha (a^*), indicando que as madeiras mais densas apresentam menos pigmento vermelho. Entretanto, observando o gráfico de dispersão (Figura 31), notam-se comportamentos distintos entre os grupos de madeiras amareladas (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis*) e avermelhadas (*Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*). Para o grupo de madeiras avermelhadas, nota-se que a tonalidade vermelha aumenta com a densidade enquanto no grupo das madeiras amarelas, a densidade diminui com o aumento de b^* .

A densidade apresentou uma correlação significativa e positiva com os valores de ângulo, indicando que as madeiras mais densas apresentam menor molhabilidade (maiores ângulos de contato), entretanto essas correlações também foram fracas. Estudos realizados por Pereira (2017) mostraram que o efeito da densidade da madeira no ângulo de contato é menor que o efeito da rugosidade superficial e da composição química dos extrativos. O fenômeno de molhabilidade da superfície da madeira é complexo e envolve a absorção de água por capilaridade e pelos grupos hidroxílicos (OH^-) dos polímeros da parede celular. A penetração de água por capilaridade, por sua vez, é afetada pela rugosidade superficial (DENES et al., 2005) e pela relação porosidade-densidade, enquanto a composição química afeta a energia superficial.

Tabela 9. Correlação entre densidade, variáveis colorimétricas e ângulo de contato das madeiras de eucalipto.

Variáveis	L*	a*	b*	C* _{ab}	h _{ab}	Ângulo inicial	Ângulo final	Ângulo médio
Densidade	-0,39*	-0,36*	0,48*	-0,07 ^{NS}	0,58*	0,44*	0,26*	0,28*
L*		-0,40*	-0,51*	-0,58*	0,25*	-0,30*	-0,44*	-0,45*
a*			0,25*	0,85*	-0,96*	0,07 ^{NS}	0,48*	0,41*
b*				0,72*	-0,01 ^{NS}	0,38*	0,46*	0,46*
C* _{ab}					-0,69*	0,25*	0,58*	0,54*
h _{ab}						0,04 ^{NS}	-0,36*	-0,29*

L* = luminosidade, a* = vermelho, b* = amarelo, C*_{ab} = croma e h*_{ab} = ângulo de tonalidade. *Significativo. ^{NS} Não significativo. As correlações de Pearson de densidade foram feitas somente para a superfície fresca.

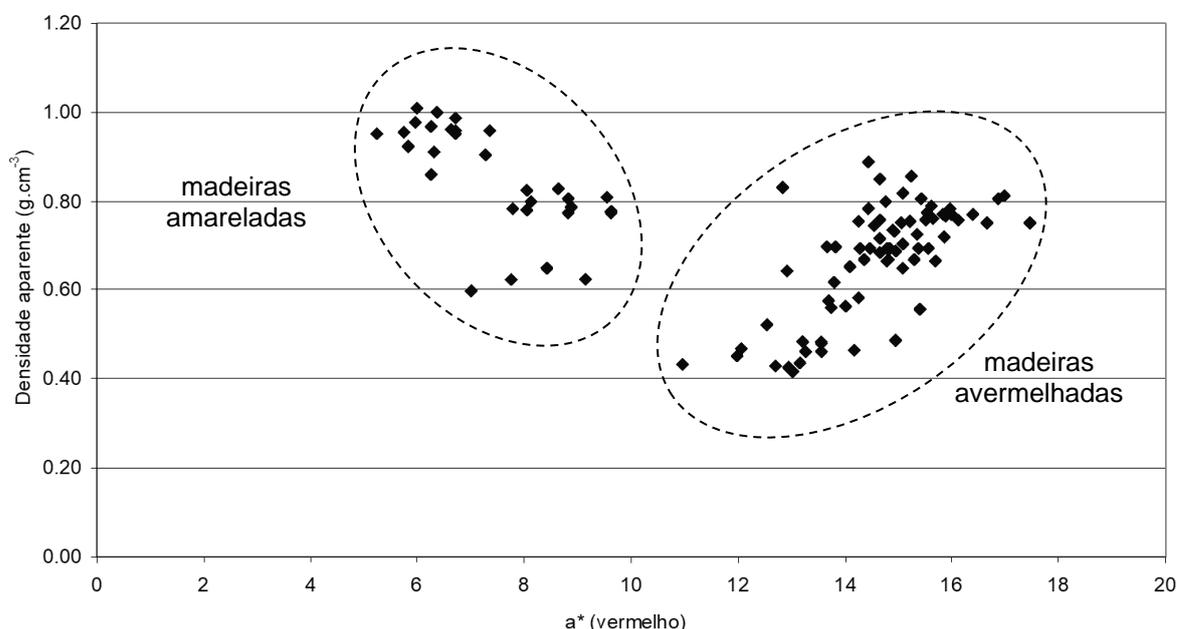


Figura 31. Correlação entre a densidade aparente (12% U) e a tonalidade vermelha (a*) das madeiras de eucalipto.

Correlações significativas foram encontradas entre as variáveis colorimétricas e o ângulo de contato, em que foram considerados na análise todos os intervalos de tempo de acondicionamento (Tabela 9). O ângulo de contato apresentou uma correlação significativa e negativa com L*, ou seja, quanto maior o ângulo de contato (menos molhável a superfície) menor o valor de L* e vice-versa. Isso demonstra que, com o envelhecimento, a superfície da madeira torna-se mais escura (menor L*) e menos molhável (maior ângulo de contato). As variáveis cromáticas (a*, b* e C*_{ab}) apresentaram correlações mais importantes com os ângulos final e médio do que com o ângulo inicial (Tabela 9). As variáveis a* e h_{ab} não apresentaram correlações significativas com ângulo inicial. A variável C*_{ab} apresentou a melhor correlação com as variáveis de ângulo de contato, indicando que, o envelhecimento aumenta a cromaticidade da madeira e os valores de ângulo. Portanto, o escurecimento e o aumento da cromaticidade são indicadores do processo de inativação da superfície da madeira nas espécies de eucalipto estudadas.

4 CONCLUSÕES

As madeiras de eucalipto foram agrupadas em três classes de densidade: muito alta (*Corymbia citriodora*), alta (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla*) e baixa (*Eucalyptus grandis*); e dois grupos de cor: amareladas (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis*) e avermelhadas (*Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*).

O envelhecimento alterou a cor das madeiras de eucalipto, exceto de *Eucalyptus saligna*; e afetou a molhabilidade da superfície causando um aumento no ângulo de contato.

O envelhecimento diminuiu a luminosidade (menor L^*) e aumentou a cromaticidade das madeiras de eucalipto. O ângulo de tonalidade (h_{ab}) da madeira de *Eucalyptus grandis* aumentou após o acondicionamento de 28 dias, indicando que sua superfície se tornou mais amarelada. A diferença de cor (ΔE^*_{ab}) após o armazenamento foi mais importante para as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus robusta*.

A densidade da madeira tem um efeito mais importante na fase inicial da molhabilidade, afetando pouco o ângulo de contato ao longo do tempo. As variáveis colorimétricas da madeira tiveram um efeito maior no ângulo de contato ao longo do tempo que a densidade aparente. O *Corymbia citriodora* apresentou densidade muito alta e baixa cromaticidade, o que causou baixa molhabilidade no início (efeito da densidade) e um aumento da molhabilidade ao longo do tempo (efeito da baixa cromaticidade).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2395-93**: Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Philadelphia, 1999.

ATAYDE, C. M.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de Muirapiranga (*Brosimum sp.*). **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 231-235, 2011.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 2, p.430-440, 2005.

BARRICHELLO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira**. Piracicaba: ESALQ, 125 p, 1985.

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

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Natural weathering performance of three fast-growing eucalypt woods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 4, p. 799-808, 2015.

COSTA, J. A.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 133-139, 2011.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ L. **Quality of Machined Wood Surfaces**. Basel, Switzerland: Springer International Publishing. 265p. 2015

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

ELEOTÉRIO, J. R.; REICHERT, D.; HORNBERG, K. F.; MENEGUELLI, I. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2014.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoramento genético da densidade básica da madeira do eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3, Manaus, 1978. **Anais**. São Paulo, SBS, v. 2, p. 148-52, 1978.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, n. 10, p. 17-37, 1975.

FOELKEL, C. E. B. Madeira de eucalipto: da floresta ao digestor. **IPEF**, v. 6, n. 20, p. 1-25, 1978.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL–GTR–190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.

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

GARDNER, D. J.; WOLCOTT, M. P.; WILSON, L.; HUANG, Y.; CARPENTER, M. Our understanding of wood surface chemistry in 1995. Proceedings N^o.7296. **Wood Adhesives 1995**. Forest Product Society, Madison, WI. Pages 29-36, 1995.

GARCIA, R. A.; OLIVEIRA, N. S.; NASCIMENTO, A. M.; DIAS N. S. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, n. 4, 2014.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRADNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, v. 18, p. 102-108, 2004.

GINDL M.; REITERER A.; SINN G.; STANZL-TSCHEGG S. E. Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 62, n. 4, p. 273-280, 2004.

GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G.; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F.; VALLE, A. T. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, v. 20, n. 72, p. 47-58, 2001.

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

GUTIÉRREZ, A.; DEL RÍO, J. C.; MARTINEZ, M. J. A. T.; MARTINEZ, A. T.; Lipophilic extractives in process water during manufacturing of totally chlorine free kraft pulp from eucalypt wood. **Trends in Biotechnology**, v. 19, n. 9, p. 340-348, 2001.

HIKITA, Y.; TOYODA, T.; AZUMA, M. Weathering testing of timber: discoloration. In: IMAMURA, Y. **High performance utilization of wood for outdoor uses**. Kyoto: Press-Net, 2001.

HILLIS, W. E. Historical uses of extractives and exudates. In: ROWELL R. M. (Ed.) **Natural Products of Woody Plants**. Vol. I. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 1-131, 1989.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório IBÁ 2016. Brasília: Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf. Acesso em: 08 de maio de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Relatório Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2017>. Acesso em 09 de dezembro de 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo, 59 p. 2003.

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

KONICA MINOLTA SENSING INC. **Comunicação precisa da cor: Controle de qualidade da percepção à instrumentação**. 59 p. 1998.

KRÁNITZ, K.; SONDEREGGER, W.; BUES, C. T.; NIEMZ, P. Effects of aging on wood: a literature review. **Wood science and technology**, Berlim, v. 50, n. 1, p. 7-22, 2016.

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

LATTHE, S. S.; TERASHIMA, C.; NAKATA, K.; FUJISHIMA, A. Superhydrophobic surfaces developed by mimicking hierarchical surface morphology of lotus leaf. **Molecules**, v. 19, n. 4, p. 4256-4283, 2014.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Review article: use of the wettability in the investigation of the corrosion behaviour of the refractory materials. **Cerâmica**, v. 54, n. 330, p. 174-183, 2008.

MATSUO M.; YOKOYAMA M.; UMEMURA K.; SUGIYAMA J.; KAWAI S.; GRIL J.; KUBODERA S.; MITSUTANI T.; OZAKI H.; SAKAMOTO M.; IMAMURA M. Aging of wood: analysis of color changes during natural aging and heat treatment. **Holzforschung**, v. 65, p. 361-368, 2011.

MEDEIROS NETO, P. N. **Resistência natural da madeira de sete espécies de *Eucalyptus* a agentes xilófagos**. 2017. 123 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.

MIKLECIC J.; KASA A.; JIROUS-RAJKOVIC V. Colour changes of modified oak wood in indoor environment. **European Journal Wood and Wood Products**, v. 70, p. 385-387, 2012.

MIKLECIC J.; JIROUS-RAJKOVIC V.; ANTONOVIC A.; SPANIC N. Discoloration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposure. **Bioresources**, v. 6, p. 434-446, 2011.

MOYA, R.; BERROCAL, A. Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. **Annals of Forest Science**, v. 67, n. 1, p. 109, 2010.

MUÑIZ, G. I. B. Fatores que limitam a utilização da madeira de *Eucalyptus*. In: SEMINÁRIO SÓLIDOS DE EUCALIPTO: AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS, 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFPA, 2002. p. 30-63.

NUSSBAUM, R. M. The time limit to avoid natural inactivation of spruce surfaces intended for painting or gluing. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 54, n. 1, p. 26-26, 1996.

NUSSBAUM, R. M. Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 57, n. 6, p. 419-424, 1999.

NUSSBAUM, R. M.; STERLEY, M. The effect of wood extractive content on glue adhesion and surface wettability of wood. **Wood and fiber science**, v. 34, n. 1, p. 57-71, 2002.

NYLUND, J.; SUNDBERG, K.; SHEN, Q.; ROSENOLM, J. B. Determination of surface energy and wettability of wood resins. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 133, n. 3, p. 261-268, 1998.

OLIVEIRA, J. T. S.; FILHO, M. T.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; MOURA, L. F.; NOLASCO, A. M.; CARVALHO, A. M.; GARCIA, R. A. Surface roughness of heat treated *Eucalyptus grandis* wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 16, n. 1, p. 3-12, 2014.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M.; GARCIA, R. A. Avaliação da superfície da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden tratada termicamente. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 145-152, 2015.

PEREIRA, K. R. M. **Análise físico-química e molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas**. 2017. 103 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017.

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, n. 4, p. 490-510, 2010.

RIBEIRO, F. de A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, n. 46, p. 76-85, 1993.

SANTONI, I.; PIZZO, B. Effect of surface conditions related to machining and air exposure on wettability of different Mediterranean wood species. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 7, p. 743-753, 2011.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes idades, visando sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J. R. M.; MUÑIZ, G. I. B.; LIMA, J. T.; BONDUELLE, A. F. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 479-487, 2005.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* em diferentes regiões da medula à casca. **Cerne**, v. 13, n. 1, p. 25-31, 2007.

SILVA, J. R. M.; MARTINS, M.; OLIVEIRA, G. M. V.; BRAGA, P. P. C. Parâmetros de qualidade da usinagem para a determinação dos diferentes usos da madeira de *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 15, n. 1, p. 75-83, 2009.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry, fundamentals and applications**. New York, Editora: Academic Press, 293 p. 1993.

SONDEREGGER, W.; KRÁNITZ, K.; BUES, C. T.; NIEMZ, P. Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood. **Journal of Cultural Heritage**, v. 16, n. 6, p. 883-889, 2015.

SOUZA, M. O. A.; SILVA, J. C.; LUCIA, R. M. D.; EVANGELISTA, W. V. Avaliação da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* em ensaios de usinagem, visando à produção moveleira. **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 751-758, 2009.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 14, p. 28-38. 1987.

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

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA; LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS. Mercado aponta uso do eucalipto para móveis. Revista da Madeira, n.103, 2007. Disponível em:http://remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1053&subject=Eucalipto&title=Mercado%20aponta%20uso%20do%20eucalipto%20para%20m%F3veis Acesso em: 11 jun. 2015.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Chap. 9, p. 1-24. 1999.

WÅLINDER, M. **Wetting phenomena on wood: factors influencing measurements of wood wettability**. 2000. 70f. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) – KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.

CAPÍTULO II

EFEITO DO ENVELHECIMENTO DA SUPERFÍCIE NA ADERÊNCIA DO VERNIZ EM MADEIRAS DE EUCALIPTO

**EFFECT OF THE SURFACE AGING ON THE VARNISH ADHERENCE
IN EUCALYPT WOODS**

RESUMO

O desempenho de um revestimento na superfície da madeira pode ser afetado por diversos fatores, entre eles o tempo transcorrido entre o preparo da superfície e a aplicação do revestimento. Uma melhor compreensão sobre a molhabilidade da superfície e os mecanismos de adesão é de grande importância para a maior durabilidade do produto final. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tempo de envelhecimento da superfície no desempenho do verniz em madeiras de eucalipto e sua correlação com a molhabilidade da superfície. Foram estudadas três espécies de madeira de eucalipto com 12 anos de idade: *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*. A molhabilidade da superfície das madeiras foi determinada pelas análises de ângulo de contato utilizando o goniômetro de imagem FTÅ D200. O desempenho de um verniz à base de água foi avaliado pelo teste de resistência à tração (*pull-off*). As análises de ângulo de contato e o teste de resistência à tração foram realizados na superfície fresca (recém-usinada) e envelhecida após 4, 8, 24 e 48 h do aplainamento. Os resultados mostraram uma redução na molhabilidade da superfície, assim como perda de adesão do revestimento com o aumento do tempo de envelhecimento. A perda de adesão ocorreu, geralmente, logo após às 4 h do aplainamento, entretanto, um efeito mais importante é observado após 48 h do aplainamento. Os resultados mostram também que em algumas espécies de eucalipto, a perda de adesão é mais rápida que em outras. Nenhuma correlação foi encontrada entre a molhabilidade da superfície e a adesão do verniz nas madeiras de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*, entretanto, na madeira de *Corymbia citriodora* a resistência à tração diminuiu com o aumento do ângulo de contato médio, mostrando uma correlação significativa.

Palavras chaves: ângulo de contato, teste de pull-off, usinagem, verniz à base de água.

ABSTRACT

The performance of coating on the surface of the wood can be affected by several factors, such as the time elapsed between the preparation of the surface and the application of the coating. A better understanding of surface wetting and adhesion mechanisms is big important for longer durability of the final product. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of the aging time of the surfaces before varnishing on the performance of varnish in eucalyptus woods and its correlation with surface wettability. Three species of 12 years-old eucalypt woods were studied: *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, and *Eucalyptus pellita*. The wettability of the wood surface was determined by the contact angle analysis using the FTÅ D200 image goniometer. The performance of a water-borne varnish was evaluated by the tensile strength test (pull-off). The contact angle analysis and the tensile strength test were performed on the fresh surface (freshly machined) and aged after 4, 8, 24 and 48 h of the planing. The results showed a decrease in surface wettability as well as the loss of coating adhesion with increasing aging time. Loss of adhesion usually occurs shortly after 4 h of planning, however, a more important effect is observed after 48 h of planning. Also, the results show that in some eucalypt species, loss of adhesion is faster than in others. No correlation was found between surface wettability and varnish adhesion on *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus pellita* woods. However, in *Corymbia citriodora* wood, the tensile strength decreased with increasing mean contact angle, showing a significant correlation.

Keywords: contact angle, pull-off test, machining, water-borne varnish.

1 INTRODUÇÃO

Os acabamentos para madeira têm como propósito melhorar a estética da superfície usinada garantindo a durabilidade do produto madeireiro. Maiores conhecimentos sobre a estrutura da madeira, os parâmetros de usinagem e os acabamentos são imprescindíveis para compreender as relações que resultam na qualidade do produto final (NÉRI et al., 1999).

Os produtos utilizados em acabamentos de madeira principalmente na indústria moveleira são seladores, tintas, vernizes, óleos, ceras e massas (WATAI, 1995; SILVA et al., 2002). Os vernizes são tintas incolores, soluções de goma, essência ou óleos secativos podendo ser naturais ou sintéticos, utilizados no acabamento final da superfície da madeira (WATAI, 1995; SILVA et al., 2002). O verniz deve formar uma película, ser duro e elástico, perfeitamente aderido ao substrato, ser inerte à ação do meio ambiente e resistente a fatores físicos e químicos (SENAI, 1995). Atualmente, a utilização de vernizes à base de água vêm ganhando interesse principalmente por apresentar menor impacto ambiental quando comparado aos vernizes convencionais (à base de poliuretano ou nitrocelulose). O verniz à base de água possui uma coloração esbranquiçada, entretanto, ao secar ele fica transparente, sem amarelar ou alterar a cor da madeira. Os produtos para revestimento à base de água são significativamente mais duráveis que seus similares à base de solvente, tanto à resistência ao atrito quanto à abrasão (SILVA et al., 2002).

Os revestimentos da superfície da madeira devem apresentar certas propriedades que influenciam diretamente no rendimento, na qualidade e nas condições de segurança do operador. Essas informações, geralmente, são fornecidas pelo fabricante, pelos rótulos das embalagens e boletins técnicos. As propriedades mais importantes de um revestimento são: teor de sólidos, viscosidade, poder de cobertura, tempo de intervalo entre demãos, tempo de armazenagem, *pot life*, brilho, abrasividade, dureza, aderência, espessura da camada, resistência à corrosão em ambientes salinos, densidade, gramatura, moagem ou fineza da tinta, aditivos, ponto de ignição e de fulgo (SILVA et al., 2002).

A adesão da madeira é um fenômeno físico-químico, que envolve um mecanismo de interação entre superfícies sólidas (uma aderente e outra adesiva) com capacidade de manter outros materiais unidos em sua superfície (BIANCHE et al., 2017). Uma das principais funções do adesivo, além do processo de colagem, é fluir e preencher os espaços vazios nos locais a serem colados, promovendo uma melhor interação entre o adesivo e o substrato (BIANCHE et al., 2017), sendo assim, uma melhor compreensão dos mecanismos de adesão na superfície da madeira é fundamental para aumentar a vida útil do verniz especialmente para usos exteriores (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005). O desempenho de um revestimento pode ser avaliado através do teste de resistência à tração, este teste pode ser medido por vários métodos tais como o teste de aderência (*pull-off*).

As análises de molhabilidade proporcionam informações importantes sobre o desempenho do revestimento nas superfícies de madeira logo após os processos de usinagem (STANGERLIN et al., 2013). Este fenômeno pode ser definido como sendo as manifestações macroscópicas das interações entre líquidos e sólidos em contato com a interface (BERG, 1993). Em geral, os estudos de molhabilidade em madeiras têm visado a otimização dos processos que envolvem a aplicação de produtos de acabamento e colagem das superfícies (ROWELL, 2005). Uma boa molhabilidade contribui para uma melhor adesão, pois proporciona uma melhor interação das forças interpolares a nível molecular entre o verniz e a superfície da madeira (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005).

As exposições da superfície da madeira aos agentes ambientais e naturais ocasionam um envelhecimento da mesma. Este envelhecimento é indicado por uma diminuição na capacidade de colagem ou envernizamento (AYDIN, 2004). Este fenômeno é conhecido na literatura como inativação da superfície, o qual provoca uma diminuição na molhabilidade da

madeira (VICK, 1999; GINDL et al., 2001a; AYDIN, 2004; GINDL, 2004). Além do envelhecimento natural que ocorre na superfície da madeira, o tempo de armazenamento também pode diminuir a molhabilidade.

A inativação da superfície pode ser explicada por mecanismos físicos tais como: a migração dos extrativos para a superfície da madeira, oxidação, reorientação das células e fechamento irreversível de microporos nas paredes celulares da madeira (MARRA, 1992; NUSSBAUM, 1999; AYDIN, 2004). De acordo com Aydin (2004), a inativação da superfície inicia-se rapidamente em um curto período de tempo e mesmo madeiras recém-usinadas podem ter sua superfície inativa. A taxa e quantidade de inativação vão depender da espécie, da temperatura em que a superfície foi exposta e do tempo de armazenamento. Segundo Sernek et al. (2004), a medição do ângulo de contato pode descrever o processo de inativação da superfície da madeira. Com efeito, a inativação é caracterizada por altos ângulos de contato e baixa adesão da madeira com o tempo. Sendo assim, este estudo visou testar as seguintes hipóteses: (i) a molhabilidade da superfície da madeira é influenciada pelo tempo de envelhecimento e pelo preparo da superfície; (ii) o tempo de envelhecimento afeta a adesão do verniz; (iii) há correlação entre a molhabilidade da superfície e a adesão do verniz ao longo do tempo de envelhecimento após o aplainamento.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tempo de envelhecimento na resistência à tração (*pull-off*) do verniz e sua correlação com a molhabilidade da superfície das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparo do Material

As espécies de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus pellita* F. Muell (Família: Myrtaceae) avaliadas neste estudo foram provenientes de árvores de 12 anos de idade, coletadas em um plantio da empresa florestal Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA S.A., situada no município de Guanhães, Minas Gerais (latitude: 18° 46' 16" S; longitude: 42° 55' 55" O; e altitude: 744 m). Amostras tangenciais do cerne com dimensões de 250 x 70 x 30 mm (comprimento x largura x espessura) foram obtidas de uma ou duas toras por espécie. As amostras foram aplainadas em ambas as faces e acondicionadas em câmara climática a 20° C e 65% de UR até alcançar peso constante. O aplainamento das amostras foi realizado com uma plaina desgrossadeira Rotoplan em corte 0-90° com velocidade de avanço de 6 a 30 m/min e profundidade de passagem de 1 mm correspondendo a largura do comprimento de onda de 1 mm. Antes da operação de usinagem foi realizado o afiamento da faca de corte. O teor de umidade das amostras após o acondicionamento foi de aproximadamente 12%. Foram utilizadas 18 amostras para *Corymbia citriodora*, 12 amostras para *Eucalyptus camaldulensis* e 16 amostras para *Eucalyptus pellita*.

2.2 Análise de molhabilidade da superfície

A molhabilidade da superfície das madeiras de eucalipto foi avaliada pelas análises de ângulo de contato obtidas pelo método da gota séssil com o goniômetro de imagem FTÅ D200. Este equipamento é composto por uma câmera de vídeo com resolução de 640 pixels x 480 pixels, que captura imagens da gota na superfície da amostra. A análise das imagens geradas pela câmera e a medição do ângulo de contato foram realizadas pelo programa FTA32.

As medições foram realizadas em ambiente a 20°C. Uma gotícula de água destilada de 3 µl foi colocada no centro da superfície aplainada de cada amostra de madeira na direção longitudinal (paralelo às fibras) utilizando uma seringa e imagens foram capturadas sistematicamente a cada 0,5 s durante 120 s. A partir dessas imagens, o contorno da gota e o ângulo de contato médio (lado direito e esquerdo da gota) para cada ponto foram calculados pelo software de análise de imagens FTA32 (Figura 32). Foram mensurados dois pontos por amostra e em cada ponto foram tomadas 24 leituras de ângulo de contato (uma leitura a cada 5 s). As medições foram realizadas na superfície fresca (recém aplainada) e envelhecida após 4, 8, 24 e 48 h do aplainamento. As amostras foram mantidas em câmara climática a 20°C e 65% RH entre uma medição e outra.

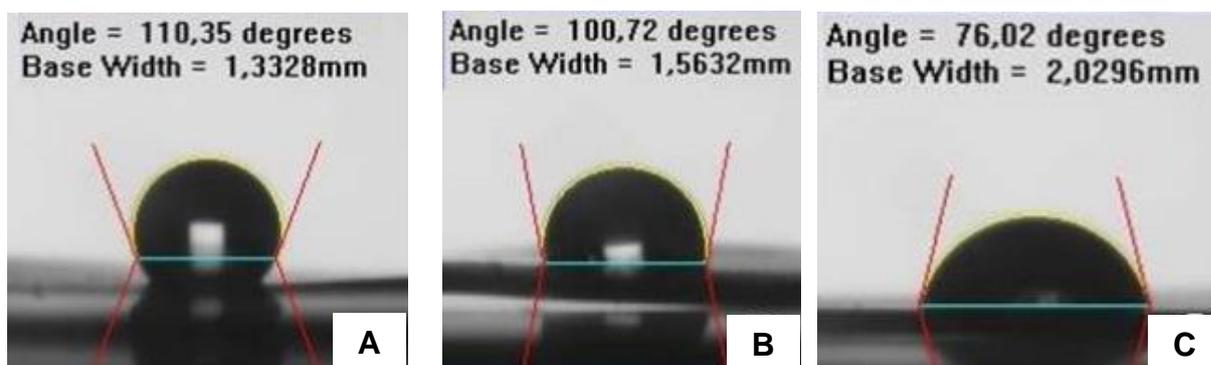


Figura 32. Cálculo do ângulo de contato médio (média dos ângulos de contato formados nos lados direito e esquerdo) para diferentes formatos de gota (MÁXIMO et al., 2016).

2.3 Aplicação do verniz

A aplicação do verniz foi realizada em câmara de pintura com uma pistola pulverizadora da marca Kremlin-Graco disponível no Laboratório de Acabamentos da Madeira no Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMR) da Université Laval (Québec-QC, Canadá). Após o aplainamento, a área da superfície das amostras (250 x 70 mm) foi dividida em cinco sub-áreas iguais de 50 x 70 mm² e cada sub-área foi envernizada na condição fresca e envelhecida após 4, 8, 24 e 48 h do aplainamento (Figura 33). Para o envernizamento por completo e por igual das amostras de cada tratamento, foram confeccionados gabaritos de proteção para a superfície das amostras de madeira de modo que cada sub-área recebesse a mesma quantidade de verniz.

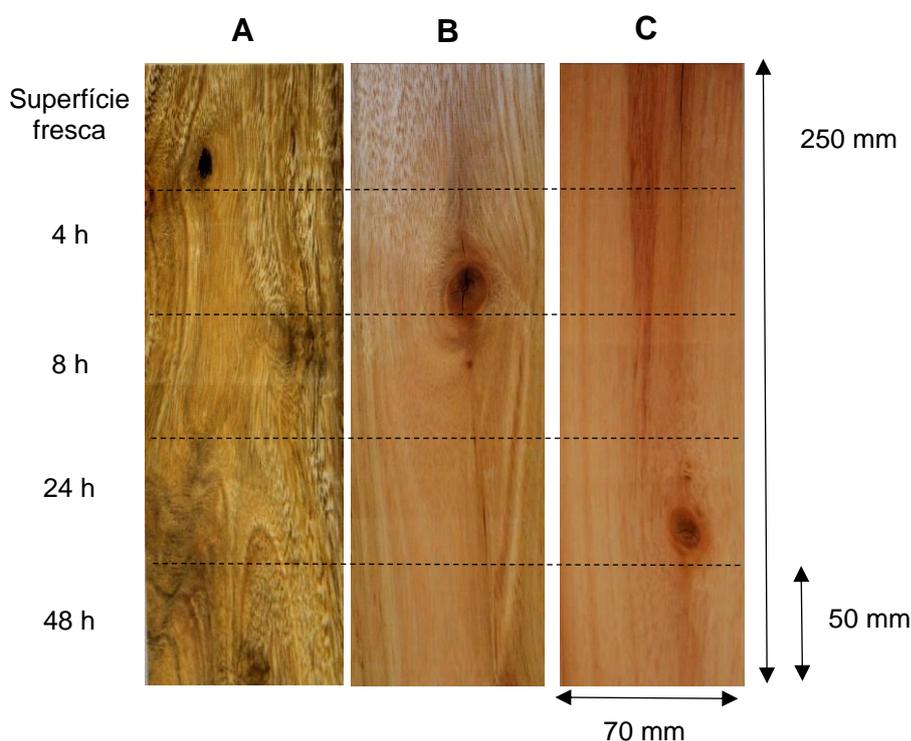


Figura 33. Aspecto visual das madeiras após o envernizamento nas superfícies fresca e envelhecidas após 4, 8, 24 e 48 h do aplainamento. (A) *Corymbia citriodora*. (B) *Eucalyptus camaldulensis*. (C) *Eucalyptus pellita*.

Para cada condição estabelecida, foram aplicadas três camadas de verniz à base de água EX-3 Fini-tech 3000, em temperatura ambiente de acordo com as especificações do fabricante. A espessura do filme formado pelo revestimento em cada camada foi de 300 µm, sendo esta medida verificada com um auxílio de um gabarito. O tempo de cura do verniz entre a aplicação de uma camada e outra foi de 24 h. Após a secagem do revestimento, a superfície envernizada foi ligeiramente lixada com uma lixa de granulometria de 320, antes de receber uma nova camada.

Antes e após a aplicação do verniz, as amostras foram mantidas em câmara climática (20°C e 65% UR) em um suporte com inclinação de 45° a fim de se evitar o acúmulo de pó nas superfícies das madeiras (Figura 34).



Figura 34. Suporte com inclinação de 45° utilizado para o acondicionamento das amostras de madeira, antes e após a aplicação do verniz.

2.4 Teste de adesão do verniz

A adesão do verniz na superfície das madeiras foi avaliada pelo teste de resistência à tração, também conhecido como teste de *pull-off*, segundo a norma ASTM D 4541 (2002). O teste consiste em registrar a força de tração necessária para o arrancamento de pinos metálicos, de seção circular, com 20 mm de diâmetro colados à superfície da madeira utilizando uma máquina de ensaio universal MTS QTestTM/5 com velocidade constante de 1 mm/min (Figura 35). Foram utilizados cinco pinos por amostra, sendo um pino para cada sub-área correspondente aos intervalos de tempo de envelhecimento (superfície fresca; 4, 8, 24 e 48 h). Para a colagem dos pinos, foi utilizada uma resina epóxi Lepage e tempo de cura de 24 h. Um sulco circular foi, em seguida, feito em torno dos pinos para evitar a propagação de falhas para fora da área ensaiada.

A perda de adesão (PA), em porcentagem, das superfícies envelhecidas em relação à superfície fresca foi calculada para cada intervalo de tempo de envelhecimento.

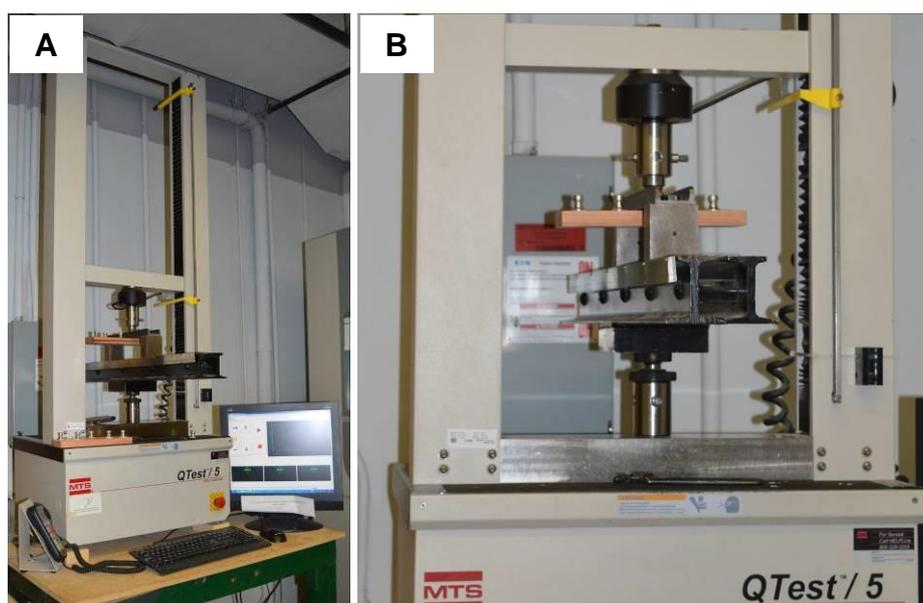


Figura 35. Ensaio de resistência à tração (*pull-off*) do verniz aplicado na superfície das madeiras de eucalipto com a máquina de ensaios universal MTS QTestTM/5.

2.5 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas com o programa STATISTICA 7.0. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene a 95% de probabilidade. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) para as variáveis que atenderam os seus pressupostos e os testes de Tukey a 95% de probabilidade para a comparação entre as médias. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi utilizado para as variáveis que não atenderam os pressupostos da ANOVA. O teste de Dun foi utilizado para a obtenção das diferenças entre as médias.

As variáveis dependentes estudadas foram o ângulo de contato médio, a resistência à tração (*pull-off*) e a perda de adesão para cada condição da superfície (fresca e envelhecida após 4, 8, 24 e 48 h do aplainamento antes do envernizamento) de cada espécie.

A correlação entre as variáveis dependentes foi verificada pelas análises de Pearson.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito do envelhecimento na molhabilidade da superfície da madeira

A Tabela 10 apresenta os resultados das análises estatísticas visando avaliar o efeito do tempo de envelhecimento após o aplainamento na molhabilidade e na adesão da superfície das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*. O tempo de envelhecimento afetou significativamente o ângulo de contato médio das madeiras de eucalipto indicando que a superfície dessas madeiras tornou-se menos molhável com o envelhecimento (Figura 36).

Tabela 10. Análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de H – Kruskal-Wallis) para avaliar o efeito do tempo do envelhecimento após o aplainamento na molhabilidade e na adesão das madeiras de eucalipto.

Espécie	Ângulo médio (°)	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão
<i>Corymbia citriodora</i>	7,54*	[11,90]*	8,07
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	7,33*	3,79*	9,70
<i>Eucalyptus pellita</i>	7,76*	3,55*	8,82

*Significativo a 95% de probabilidade. Valores entre colchetes = valor H obtido pelo teste de Kruskal-Wallis.

A molhabilidade da madeira de *Corymbia citriodora* diminuiu em função do tempo de envelhecimento (Figura 36). Os maiores valores absolutos de ângulo de contato foram encontrados após 24 h de aplainamento, enquanto que, a superfície fresca (recém-usinada) apresentou o menor valor de ângulo de contato, ou seja, maior molhabilidade (Figuras 36). Para o ângulo de contato médio da madeira de *Corymbia citriodora*, uma alteração significativa pode ser observada logo após 4 h do aplainamento, entretanto, a superfície envelhecida após 8 h do aplainamento apresentou um valor de ângulo de contato médio estatisticamente igual ao da superfície fresca (Figuras 36 e 37).

A madeira de *Eucalyptus camaldulensis* apresentou um aumento gradativo do ângulo de contato com o tempo de envelhecimento (Figura 36), entretanto, foram encontradas diferenças significativas somente para a superfície envelhecida após 48 h do aplainamento, quando comparada a superfície fresca (Figura 37). Assim, um efeito mais expressivo do tempo de envelhecimento é observado após 48 h do aplainamento, onde estas superfícies tonaram-se mais hidrofóbicas quando comparados às demais condições.

A madeira de *Eucalyptus pellita* também apresentou o menor valor de ângulo de contato para a superfície fresca, sendo esta estatisticamente igual a superfície envelhecida após 8 h de aplainamento (Figura 36 e 37). Para o ângulo de contato médio, uma menor molhabilidade (maior ângulo de contato) foi observada para as superfícies envelhecidas após 4, 24 e 48 h do aplainamento.

Estes resultados corroboram com os resultados encontrados na literatura (NUSSBAUM, 1996, 1999; NUSSBAUM; STERLEY, 2002; GINDL et al., 2004; SANTONI; PIZZO, 2011) em que a molhabilidade da madeira diminui em função do tempo de envelhecimento. Em uma superfície recém-usinada acontece um processo de transformação da superfície conhecido como inativação da superfície, cujo grau pode variar de acordo com o tempo de envelhecimento e a espécie de madeira (NUSSBAUM, 1996). É possível observar para as três espécies de eucalipto estudadas uma tendência clara da inativação da superfície com o aumento do tempo de envelhecimento após o aplainamento.

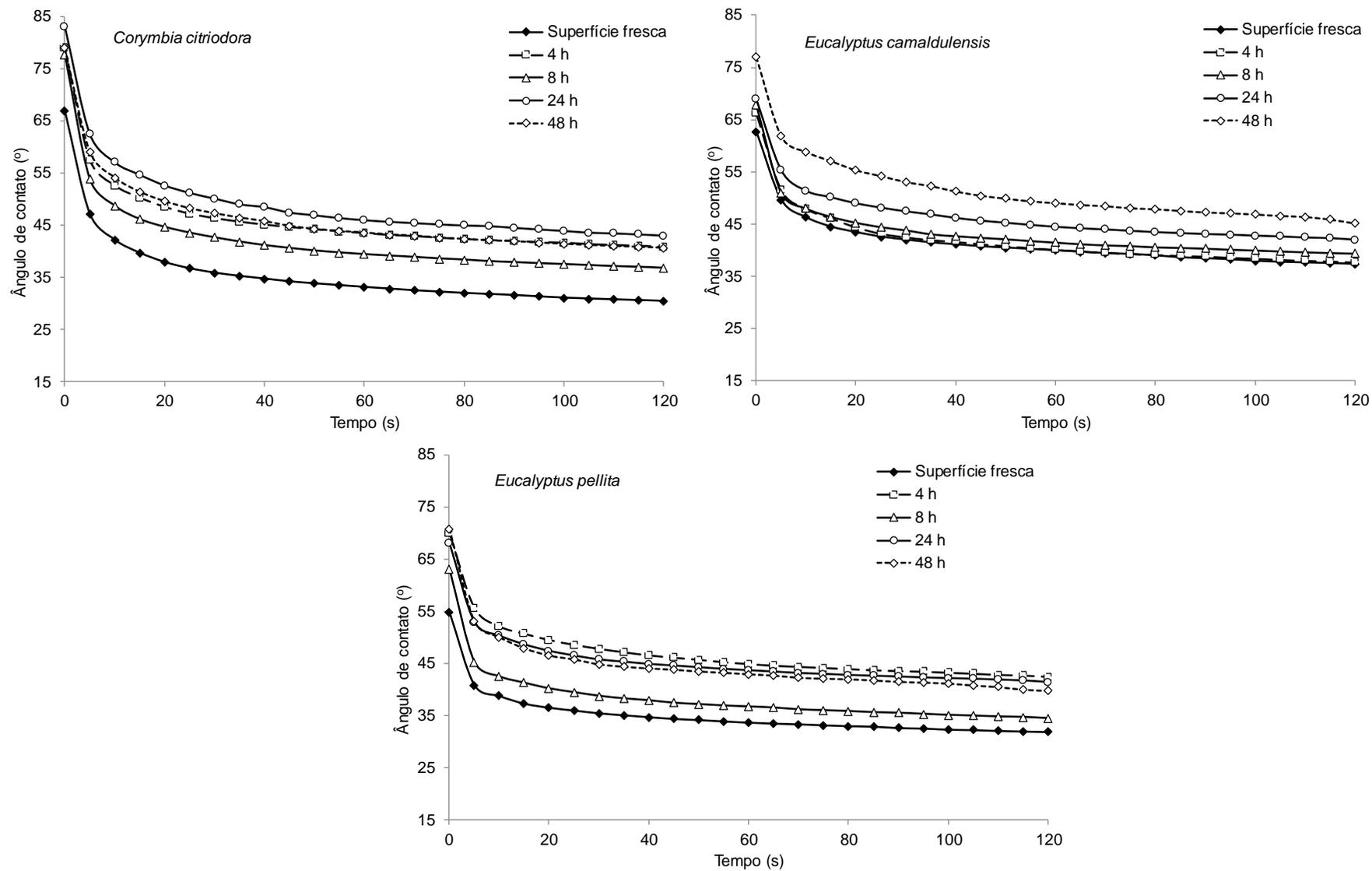


Figura 36. Comportamento do ângulo de contato na superfície das madeiras de eucalipto em função do tempo de medição para diferentes condições da superfície (fresca e envelhecida).

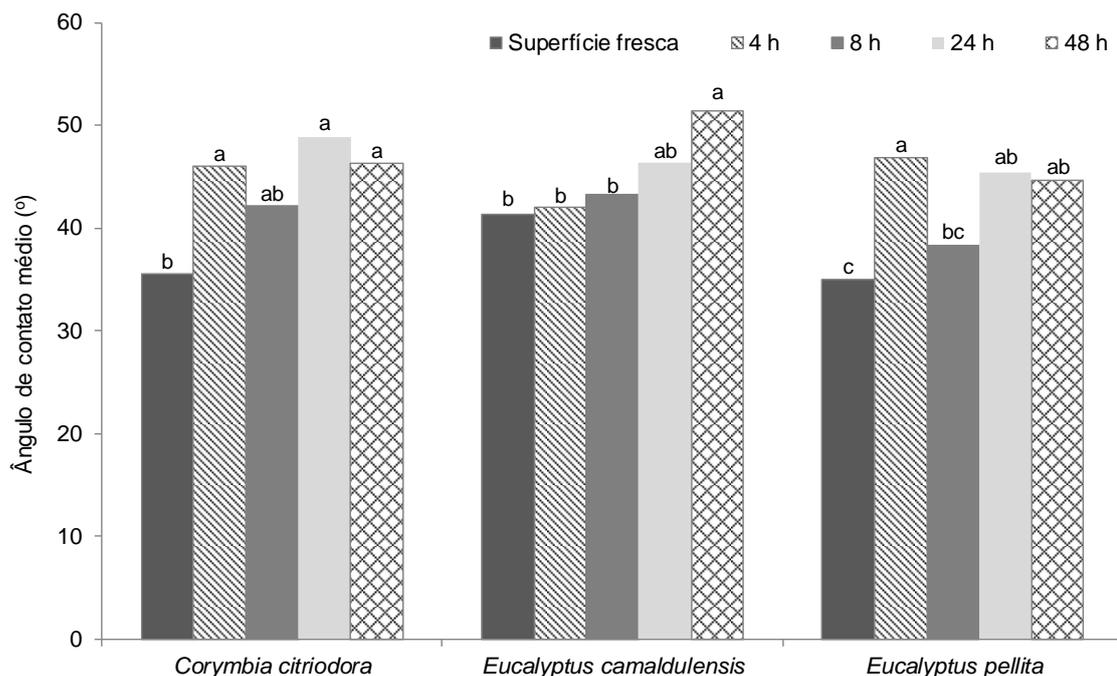


Figura 37. Efeito do tempo de envelhecimento após o aplainamento no ângulo de contato médio da superfície das madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

Um dos principais mecanismos de inativação da superfície é justamente a migração dos extrativos para as superfícies das madeiras ocasionando uma diminuição da molhabilidade, ou seja, a presença de extrativos aumentam a hidrofobicidade da superfície da madeira, de modo a repelir o seu contato com as moléculas de água (STANGERLIN et al., 2013) entre outros fatores. As madeiras de eucalipto estudadas apresentam ainda altos teores de extrativos totais com 13,89% para o *Eucalyptus camaldulensis*, 10,12% para o *Corymbia citriodora* e 7,36% para o *Eucalyptus pellita* (MEDEIROS NETO, 2017) favorecendo ao processo inativação. Entretanto, é importante ressaltar que além do teor de extrativos, a natureza dos extrativos também exerce um papel fundamental na molhabilidade das superfícies das madeiras.

3.2 Efeito do envelhecimento na adesão da madeira

O envelhecimento afetou significativamente a adesão do verniz na superfície (Tabela 10) das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*, tal como, observados pelos resultados do teste de resistência à tração (*pull-off*) (Tabela 11).

Para a madeira de *Corymbia citriodora*, a resistência à tração diminuiu com o aumento do tempo de envelhecimento (Tabela 11 e Figura 38), mostrando que o revestimento apresentou menor resistência ao *pull-off* após 48 h do aplainamento. A madeira de *Corymbia citriodora* apresentaram em média, perda de adesão de 28,5% com o envelhecimento, entretanto, após 48 h do aplainamento, a perda de adesão foi de 43%. Diferenças significativas foram encontradas apenas entre a superfície fresca (4,10 MPa) e o tempo de acondicionamento após 48 h (2,32 MPa), os quais representaram ainda os valores máximos e mínimos do teste.

Para a madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, os menores valores de resistência à tração, quando comparado com a superfície fresca, foram observados após 4 e 48 h do

aplainamento com médias de 2,97 e 3,05 MPa, respectivamente (Tabela 11 e Figura 38). Conseqüentemente, a perda de adesão nessas duas condições foi de aproximadamente 33% e 31%.

Tabela 11. Médias de resistência à tração (*pull-off*) e perda de adesão em madeiras de eucalipto após o envelhecimento.

Tempo de acondicionamento (h)	<i>Corymbia citriodora</i>		<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		<i>Eucalyptus pellita</i>	
	RT (MPa)	PA (%)	RT (MPa)	PA (%)	RT (MPa)	PA (%)
Superfície fresca	4,10 a [50,12]	-	4,44 a (0,39)	-	4,12 ab (0,36)	-
4	3,22 ab [43,87]	21	2,97 b (0,16)	33	4,73 a (0,39)	0
8	3,02 ab [43,12]	26	3,56 ab (0,30)	20	3,44 ab (0,27)	27
24	3,12 ab [41,87]	24	3,63 ab (0,35)	18	4,33 ab (0,29)	8
48	2,32 b [23,50]	43	3,05 b (0,25)	31	3,21 b (0,34)	32

RT = resistência à tração. PA = perda de adesão. Valores entre parêntesis = erro padrão. Valores entre colchetes = média dos postos obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra entre colunas não são estatisticamente diferentes entre si.

Para a espécie *Eucalyptus pellita*, observa-se um comportamento diferentes das demais espécies de eucalipto estudadas com oscilações entre os tempos de envelhecimento. Entretanto, os valores de resistência à tração foram estatisticamente iguais entre si para a superfície fresca e as superfícies envelhecidas. Por outro lado, diferenças significativas foram encontradas entre a resistência à tração após 4 h e 48 h, onde a superfície com maior tempo de envelhecimento ofereceu menor resistência ao arrancamento do verniz (Tabela 11 e Figura 38). A madeira de *Eucalyptus pellita* foi a que apresentou o melhor desempenho de adesão após 4h de envelhecimento, onde não foi observada perda de adesão.

De acordo com Gindl et al. (2004), superfícies recém-usinadas garantem uma durabilidade estendida do revestimento devido à boa condição de adesão. Nossos resultados mostram que a perda de adesão ocorre, geralmente, 4 h após o aplainamento, entretanto, um efeito mais importante é observado 48 h após do aplainamento. Os resultados mostram também que em algumas espécies de eucalipto, a perda de adesão é mais rápida que em outras. Entretanto, a perda da adesão dos revestimentos com o aumento do tempo de envelhecimento está associada principalmente com a inativação da superfície e a migração de extrativos de madeira para a superfície. O processo de inativação da superfície reduz a capacidade de um adesivo em molhar, fluir, penetrar e curar adequadamente, diminuindo a capacidade de estabelecer contato íntimo entre as moléculas da madeira e do adesivo, tornando as forças atrativas de adesão fracas (SERNEK, 2002; FOREST PRODUCT LABORATORY, 2010). Neste sentido, as três espécies de madeira de eucalipto apresentam altos teores de extrativos, sendo de 10,12% no *Corymbia citriodora*, 13,89% no *Eucalyptus camaldulensis* e 7,36 no *Eucalyptus pellita* (MEDEIROS NETO, 2017). Dessa maneira, uma possível migração dos extrativos para a superfície e inativação da mesma, podem ter influenciado a adesão do revestimento na superfície da madeira.

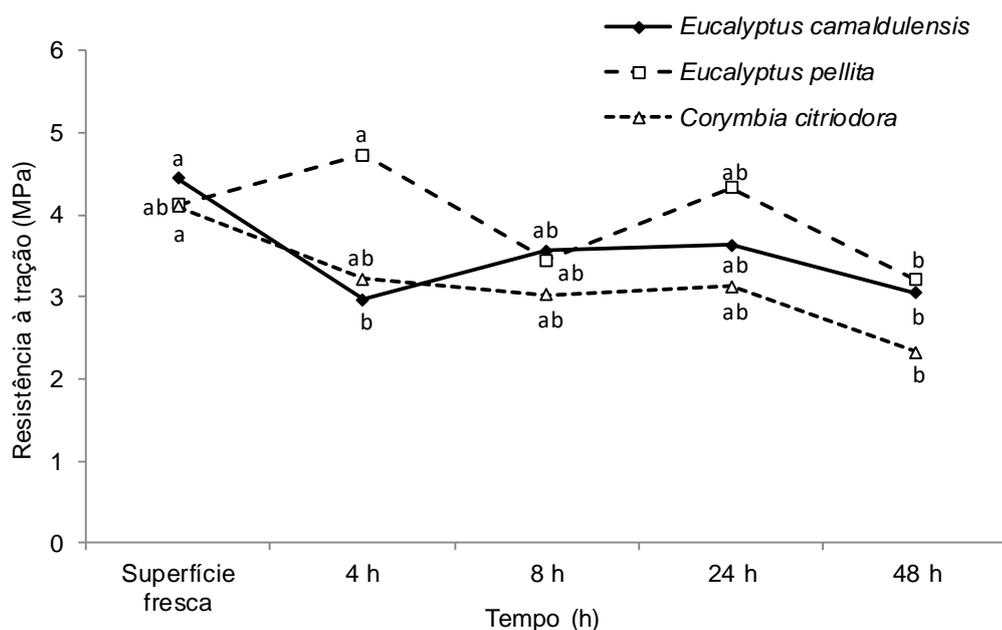


Figura 38. Efeito do tempo de envelhecimento após o aplainamento na resistência à tração (*pull-off*) do verniz em madeiras de eucalipto. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si.

3.3 Correlação entre a adesão e a molhabilidade da superfície da madeira

As análises de correlação de Pearson entre a resistência à tração (*pull-off*) e o ângulo de contato médio em função do tempo de envelhecimento das madeiras de eucalipto estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Correlações de Pearson entre a resistência à tração (*pull-off*) e a molhabilidade da superfície das madeiras de eucalipto.

Parâmetros	Ângulo de contato médio
Resistência a tração – todas as espécies	-0,08 ^{NS}
Resistência a tração – <i>Corymbia citriodora</i>	-0,21*
Resistência a tração – <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	-0,16 ^{NS}
Resistência a tração – <i>Eucalyptus pellita</i>	0,06 ^{NS}

* Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} Não significativo.

A correlação não foi significativa entre as duas variáveis quando as três espécies de eucalipto foram incluídas na análise. Quando as espécies foram analisadas separadamente, somente a madeira de *Corymbia citriodora* apresentou uma correlação significativa e negativa entre a resistência à tração e o ângulo de contato médio, apesar da correlação ser fraca. Neste caso, a resistência à tração diminuiu com o aumento do ângulo de contato médio, mostrando que o envelhecimento da madeira de *Corymbia citriodora* diminuiu a molhabilidade da superfície e a aderência do verniz. Estudos realizados por de Moura e Hernandez (2006a) mostraram que a rugosidade superficial (R_a – rugosidade média) da madeira de *Acer saccharum* Marsh. apresentou maior efeito na adesão do verniz avaliada pelo método do *pull-off* do que a molhabilidade da superfície (ângulo de contato).

4 CONCLUSÕES

O tempo transcorrido entre o preparo da superfície e o envernizamento afetou significativamente a molhabilidade da superfície das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*. Entretanto, o comportamento do ângulo de contato variou entre as espécies. Geralmente, houve um aumento do ângulo de contato em função do tempo de envelhecimento indicando que as superfícies tornaram-se mais hidrofóbicas.

A adesão do verniz foi melhor na superfície fresca, enquanto que o envelhecimento após o aplainamento reduziu a adesão do verniz. A perda de adesão em função do tempo de acondicionamento é um indicativo da inativação da superfície da madeira, ocasionada provavelmente pela migração de extrativos visto que essas espécies apresentam altos teores de extrativos.

Não foram encontradas correlações significativas entre a resistência à tração e o ângulo de contato médio das madeiras de eucalipto quando as três espécies foram incluídas na análise; entretanto, quando as espécies foram analisadas separadamente, a madeira de *Corymbia citriodora* apresentou uma correlação significativa e negativa entre a resistência à tração (*pull-off*) e o ângulo de contato médio, apesar da correlação ser fraca. Neste caso, a resistência à tração diminuiu com o aumento do ângulo de contato médio, mostrando que o envelhecimento diminuiu a molhabilidade da superfície e a aderência do verniz.

Recomenda-se a continuação deste estudo com um número maior de amostras por espécies, permitindo análises mais precisas para uma melhor avaliação do tempo de envelhecimento na molhabilidade e na adesão da superfície de madeiras de eucalipto.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AYDIN, I. Activation of wood surfaces for glue bonds by mechanical pre-treatment and its effects on some properties of veneer surfaces and plywood panels. **Applied Surface Science**, v. 233, n. 1-4, p. 268-274, 2004.

BERG, J. C. **Role of acid-base interactions in wetting and related phenomena. In: Wettability.** New York. Editora: Marcel Dekker, p.75–148, 1993.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00077114, 2017.

DE MOURA, L. F.; HERNÁNDEZ, R. E. Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood. **Wood Fiber and Science**, v. 37, n. 2, p. 355-366, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material.** General Technical Report FPL–GTR–190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.

GINDL, M.; SINN, G.; REITERER, A.; TSCHEGG, S. Wood surface energy and time dependence of wettability: A comparison of different wood surfaces using an acid-base approach. **Holzforschung**, v. 55, p. 433-440, 2001a.

GINDL M.; REITERER A.; SINN G.; STANZL-TSCHEGG S. E. Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 62, n. 4, p. 273-280, 2004.

MARRA, A. A. **Technology of Wood bonding: principles and practice.** Nova York, Van N. Reinhold, 454p. 1992.

MAXIMO, D.; ELIAS, C. N.; FERNANDES D. J.; MONTEIRO, F. O.; CAVALCANTI, J. Análise da superfície e osseointegração de implantes dentários com superfícies biomiméticas contendo Ca, Mg e F. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 196-203. 2016.

MEDEIROS NETO, P. N. **Resistência natural da madeira de sete espécies de *Eucalyptus* a agentes xilófagos.** 2017. 123 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro ES, 2017.

MARTINS, S. A.; DOS SANTOS, C. M. T.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Envelhecimento artificial acelerado por radiação ultravioleta de madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, v. 41, n. 1, p.87-96, 2011.

NERI, A. C.; GONÇALVES, R.; HERNÁNDEZ, R. E. Forças de corte ortogonal 90-0 em três espécies de madeira de eucalipto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 239-244, 1999.

NUSSBAUM, R. M. Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 57, n. 6, p. 419-424, 1999.

NUSSBAUM, R. M.; STERLEY, M. The effect of wood extractive content on glue adhesion and surface wettability of wood. **Wood and fiber science**, v. 34, n. 1, p. 57-71, 2002.

ROWELL R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Estados Unidos: Editora CRC Press, 2005.

SERNEK, M.; KAMKE, F. A.; MOTNIK SERNEK, I. Influence of temperature and time on the curing of uf adhesives. **Forest Product Society**. p.106-107. 2000.

SERNEK, M.; KAMKE, F. A.; GLASSER, W. G. Comparative analysis of inactivated wood surfaces. **Holzforschung**, v. 58, n. 1, p. 22-31, 2004.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). Acabador de móveis. Ubá, 1995. 29 p.

SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CAIXETA, J.; DELLA LUCIA, R. M. Produtos utilizados no setor de acabamento de móveis de madeira—características e técnicas de aplicação. **Lavras/MG: Editora UFLA**. 2002.

STANGERLIN, D. M.; DA COSTA, A. F.; PASTORE, T., DEL MENEZZI, C. H.; DE 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, 2013.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Chap. 9, p. 1-24. 1999.

WATAI, L. T. **Tecnologia básica em acabamentos de madeiras**, 102 p. São Paulo: IPT,1995.

CAPÍTULO III

EFEITO DA USINAGEM NA RUGOSIDADE 3D, NA MOLHABILIDADE, NA ENERGIA SUPERFICIAL E NO DESEMPENHO DO VERNIZ EM MADEIRAS DE EUCALIPTO

**EFFECT OF MACHINING IN 3D ROUGHNESS, WETTABILITY,
SURFACE ENERGY, AND PERFORMANCE OF VARNISH IN
EUCALYPT WOODS**

RESUMO

Os processos de usinagem alteram a morfologia e a química da superfície da madeira, dois fatores importantes que influenciam diretamente a molhabilidade, a energia superficial, a rugosidade, e a adesão da madeira. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das operações de usinagem (lixamento e aplainamento) na rugosidade, na molhabilidade, na energia superficial, e na aderência do verniz nas madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*. Os parâmetros de rugosidade 3D foram determinados pelo rugosímetro óptico de luz branca MicroMeasure CHR 150. A molhabilidade e a energia superficial das madeiras foram determinadas por análises de ângulo de contato com o goniômetro de imagem FTÅ D200. A energia superficial foi calculada pela teoria ácido-base de Lifshitz-van der Waals/Lewis utilizando três diferentes líquidos: água destilada, formamida e diiodometano. Os resultados mostraram que o lixamento diminuiu a rugosidade superficial mostrando menores valores para os parâmetros de amplitude (S_a , S_q , S_v e S_z) que o aplainamento. As superfícies lixadas apresentaram maior molhabilidade e energia superficial, entretanto, esta operação de usinagem não favoreceu a penetração do verniz. As superfícies aplainadas de *Eucalyptus grandis* apresentaram uma melhor adesão do revestimento que as superfícies lixadas. As superfícies mais rugosas apresentaram menor molhabilidade, menor energia superficial e maior adesão do revestimento, portanto, a rugosidade apresenta um impacto mais importante na aderência do verniz à base de água que as propriedades de molhabilidade e energia superficial.

Palavras chaves: ângulo de contato, aplainamento, lixamento, teste de *pull-off*.

ABSTRACT

Machining processes alter the morphology and the chemistry of the wood surface, two important factors that directly influence the wettability, surface energy, roughness, and adhesion of wood. The objective of this study was to evaluate the effect of machining operations (sanding and planing) on roughness, wettability, surface energy, and varnish adhesion in *Eucalyptus robusta* and *Eucalyptus grandis* woods. The 3D roughness parameters were determined by a MicroMeasure CHR 150 optic white light roughness meter. The wettability and surface energy of the woods were determined by contact angle analysis performed with FTÅ D200 goniometer. The surface energy was calculated by the Lifshitz-van der Waals/ Lewis acid-base theory using three different liquids: distilled water, formamide and diiodomethane. The adhesion of a water-borne varnish to the wood was determined by the pull-off test. The results showed that the sanding decreased the surface roughness showing lower values for the amplitude parameters (S_a , S_q , S_v and S_z) than planing. The sanded surfaces presented greater wettability and surface energy, however, this machining operation did not favor the penetration of the varnish. The planed surfaces of *Eucalyptus grandis* showed better adhesion of the coating than sanded surfaces. The rougher surfaces presented lower wettability and surface energy and higher adhesion of the coating, therefore, the roughness has a more important impact on the adhesion of the water-borne varnish to eucalyptus woods than the wettability and surface energy properties.

Keywords: contact angle, planing, sanding, pull-off test.

1 INTRODUÇÃO

As características físicas e químicas da superfície da madeira desempenham um papel importante na utilização de vários produtos de madeira, tais como painéis, pisos, assoalhos e revestimentos, móveis, etc. Portanto, uma melhor compreensão do efeito desses fatores da superfície da madeira é necessária para otimizar os processos de adesão e acabamento superficial, visando melhorar a performance de manufaturados de madeira e agregar maior valor aos produtos finais (SANDON; NAKATO, 1987; KÚDELA; KURJATKO, 2002). A rugosidade é um dos parâmetros mais difundidos e aceitos para avaliar a qualidade da superfície de um material, que depende de sua natureza e dos processos de usinagem ao qual este foi submetido. A rugosidade é definida como o conjunto de irregularidades, isto é, de pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície usinada (TAYLOR et al., 1999). Estas irregularidades podem ser determinadas pelas medições de altura, largura e pela forma dos picos e vales produzidos por operações de acabamento e pelas propriedades anatômicas (CSANÁDY et al., 2015). A partir da rugosidade superficial, pode-se averiguar se a superfície está apta para a próxima etapa ou se o produto final apresenta a qualidade exigida. Através de uma rugosidade adequada pode-se obter os padrões finais desejados e melhorar o recebimento de produtos como selantes, tintas e vernizes. Assim, o estudo sobre a rugosidade superficial é de extrema importância para a indústria de processamento da madeira, devido ao seu efeito direto sobre a qualidade do produto (JAKUB; MARTINO, 2005).

Os ensaios de rugosidade 2D, apesar de não destrutivo e de proporcionar rápida obtenção nos dados, apresenta complexidade no ajuste de seus parâmetros (ex. fixação da frequência de leitura, comprimento, profundidade e utilização de filtros mecânicos e matemáticos). Apesar da grande popularidade dos rugosímetros de agulha, estes não são adequados para serem utilizados devido à pouca representatividade da superfície e baixa correlação com os fatores envolvidos nos processos de adesão e revestimento; além de riscar a superfície pelo contato da agulha. Contudo, uma nova geração de rugosímetros de análise tridimensional (3D) surgiu, possibilitando o mapeamento de uma área representativa da superfície da madeira. O rugosímetro de análise 3D, também chamado de perfilômetro óptico, se baseia em princípios físicos relacionados à luz. Ao incidir um feixe luminoso sobre uma superfície, ele será refletido em várias direções de acordo com a inclinação do local incidente (SANDAK; TANAKA, 2003; FREITAS et al., 2014). A análise interferométrica das reflexões obtidas em uma região da peça possibilita traçar o perfil da superfície mensurada e assim obter a sua rugosidade. O processo de medição utilizando perfilometria óptica em 3D tem a vantagem de não realizar contato físico com o objeto mensurado e apresentar como resultado um mapa 3D da superfície da área medida (SANDAK; TANAKA, 2003; FREITAS et al., 2014). O rugosímetro de análise 3D apresenta inúmeras funcionalidades e uma vasta aplicabilidade na área de pesquisa, indústrias e em nível de qualidade (FREITAS et al., 2014).

A energia superficial da madeira está associada com as interações entre a superfície da madeira e um adesivo, tendo, portanto uma influência direta nos processos de adesão da madeira (QIN et al., 2015). Este parâmetro, assim como suas características foram estudadas por diversos autores (GARDNER et al., 1991, 1995; LIPTÁKOVÁ et al., 1995; LIU et al., 1998; de MEIJER et al., 2000; WÅLINDER; STROM 2001; GINDL et al., 2001a, 2001b; GINDL; TSCHEGG, 2002; de MOURA; HERNANDEZ 2005, 2006a, 2006b; COOL; HERNÁNDEZ, 2011a; QIN et al., 2015; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2015, 2016a, 2016b). O cálculo da energia superficial é feita através de análises de ângulo de contato obtidas pelo uso de diferentes líquidos de referência (GINDL et al., 2001a, 2001b; QIN et al., 2015). Existem diversas teorias para utilização da energia superficial e suas aplicações dependem principalmente da superfície a ser examinada. Os primeiros estudos foram fundamentados nas tensões superficiais críticas (Teoria de Zisman), seguidos pelo conceito de média harmônica

descrita por Wu, a equação de Neumann e finalmente a teoria ácido-base de Lifshitz-van der Waals/Lewis, a qual é baseada na utilização de três líquidos bases (VAN OSS, 1988; VOLPE; SIBONI 1997; GINDL et al., 2001a, 2001b; WÄLINDER, 2002; QIN et al., 2015).

Para a obtenção do produto final de madeira é necessária a realização de operações de usinagem, que servem também para o preparo da superfície antes da aplicação dos produtos de acabamento. As operações de usinagem consistem na furação, fresamento, lixamento, aplainamento e nos cortes, sendo o aplainamento e o lixamento os principais processos relacionados ao preparo da superfície.

O aplainamento consiste em eliminar grandes diferenças e uniformizar a superfície da madeira, enquanto o lixamento consiste em preparar a superfície da madeira para a aplicação de acabamento e amenizar marcas deixadas pelo aplainamento e depressões provenientes da anatomia da madeira. Este processo é a operação mais importante para a obtenção da qualidade da superfície durante o seu preparo (JANKOWSKA et al., 2018). O lixamento produz na superfície da madeira ranhuras típicas caracterizadas por uma camada superficial de células trituradas e lúmens obstruídos pelo pó produzido e estes fatores dificultam a penetração do revestimento nos capilares da superfície da madeira (JANKOWSKA et al., 2018). Nas superfícies aplainadas, as marcas deixadas pelo processo de usinagem estão relacionadas principalmente com a faca e a velocidade do corte e, geralmente este processo produz células abertas e levantadas como vasos e fibras, favorecendo a penetração do adesivo (KILIC et al., 2006; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005; MARTINS et al., 2011a). Portanto uma melhor compreensão dos efeitos dessas variáveis se torna necessário para obter a superfície desejada em uma condição ideal de usinagem (TAN et al., 2012). Desse modo, este estudo visa testar as seguintes hipóteses: (i) as operações de usinagem alteram a superfície das madeiras de eucalipto, a rugosidade, a molhabilidade e a energia superficial; (ii) a molhabilidade e a energia superficial da madeira são dependentes da rugosidade superficial; e (iii) há correlação entre a rugosidade, a molhabilidade, a energia superficial e a adesão do revestimento.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das operações de usinagem (lixamento e aplainamento) na rugosidade 3D, na molhabilidade, na energia superficial e na aderência do verniz em madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparo do Material

As espécies de *Eucalyptus robusta* Sm. e *Eucalyptus grandis* Hill. (Família: Myrtaceae) avaliadas neste estudo foram provenientes de árvores de 12 anos de idade, coletadas em um plantio da empresa florestal Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA S.A., situada no município de Guanhães, Minas Gerais (latitude: 18° 46' 16" S; longitude: 42° 55' 55" O; e altitude: 744 m). Amostras tangenciais do cerne com dimensões de 250 x 85 x 30 mm (comprimento x largura x espessura) foram obtidas de uma ou duas toras por espécie. Estas amostras foram então divididas no meio na direção longitudinal obtendo-se amostras pareadas de 250 x 42,5 x 30 mm (comprimento x largura x espessura) para cada tratamento de usinagem e para cada espécie (Figura 39). Após os processos de usinagem (lixamento e aplainamento) em ambas as faces, o material foi acondicionado em câmara climática a 20°C e 65% de UR até alcançar peso constante. As amostras foram acondicionadas no mesmo suporte apresentado no Capítulo II (Figura 34).

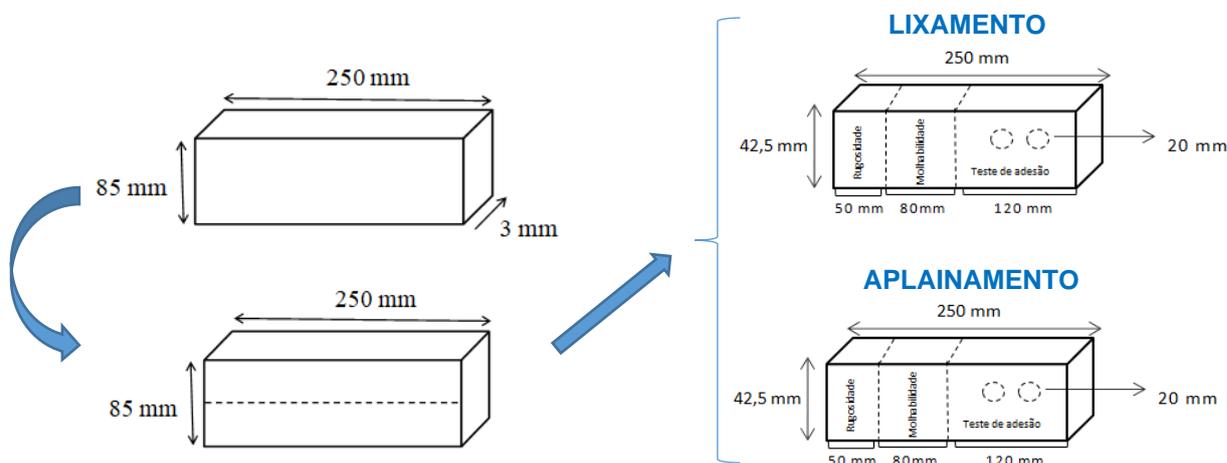


Figura 39. Dimensionamento de amostras pareadas de eucalipto para os diferentes processos de usinagem.

2.2 Processos de usinagem

Foram utilizadas dois processos de usinagem: lixamento e aplainamento. O lixamento foi realizado com uma lixadeira de cinta (COSTA, Costa and Grisson Machinert Co, Inc.) equipada com lixas de óxido de alumínio disponível no Laboratório de Usinagem da Madeira no Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMR) da Université Laval (Québec, QC, Canada). Um programa de lixamento P100-120 com velocidade de avanço de 14 m/min foi utilizado na direção longitudinal (paralela às fibras) do material. Neste programa, as amostras foram lixadas primeiramente com a lixa mais grossa (granulometria de 100), obtendo-se um lixamento mais rápido e mais profundo, seguido por uma lixa mais fina (granulometria 120) responsável pelo acabamento final da superfície.

O aplainamento das amostras foi realizado com uma plaina desgrossadeira Rotoplan em corte 0-90° com velocidade de avanço de 6 a 30 m/min e profundidade de passagem de 1 mm correspondendo a largura do comprimento de onda de 1 mm. Antes do aplainamento, foi realizado o afiamento das facas de corte. Após os processos de usinagem, as amostras foram acondicionadas em câmara climática a 20°C e 65% UR para a realização dos testes. A umidade das amostras após o acondicionamento foi de aproximadamente 12%.

2.3 Análise de rugosidade superficial 3D

As análises de rugosidade 3D das superfícies lixadas e aplainadas das madeiras de eucalipto foram determinadas pelo medidor óptico de rugosidade de luz branca MicroMeasure CHR 150. Uma área representativa de 12 x 12 mm foi predeterminada na superfície de cada amostra para análise de rugosidade 3D. A varredura da área selecionada foi realizada pelo software Surface Map 2.4.13, sendo as medições efetuadas a uma frequência de 100 Hz e velocidade de varredura de 3 mm/s. Em seguida, os dados foram tratados pelo software Mountain Map, o qual permite o mapeamento 3D da superfície da madeira (Figura 40).

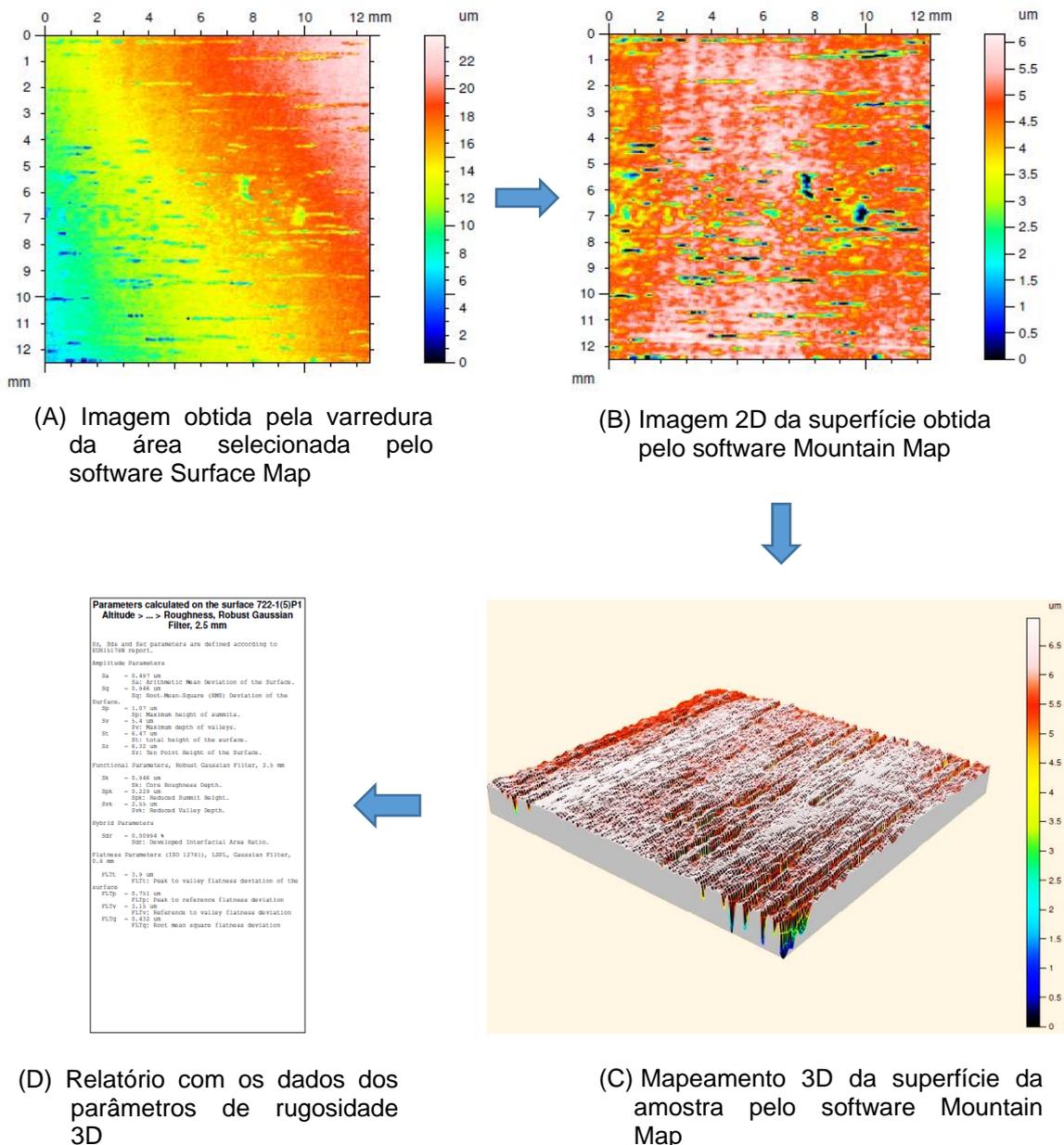


Figura 40. Etapas para as medições de rugosidade 3D na superfície das madeiras de eucalipto com o rugosímetro de luz branca MicroMeasure CHR 150.

Os parâmetros de rugosidade da superfície 3D foram então calculados usando um *cut-off* de 2,5 mm combinado a um filtro matemático de regressão gaussiana robusta (ISO 16610-

31 2002) para correção do desvio de forma e ondulações secundárias do perfil. O filtro gaussiano robusto evita as distorções produzidas por alguns filtros quando aplicados em perfis com vales profundos (TAN et al., 2012; HERNÁNDEZ et al., 2014; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2015, 2016a, 2016b). Os picos e vales contidos na área analisada foram representados por uma escala de cores onde o branco, vermelho, amarelo e suas combinações indicam os picos, o verde e o azul claro representam as regiões intermediárias e preto representam os vales.

Os parâmetros de amplitude foram calculados de acordo com a NBR 4287 (2002), sendo eles: rugosidade média da superfície (S_a), rugosidade quadrática média (S_q), altura máxima dos picos (S_p), profundidade máxima dos vales (S_v) e altura máxima do perfil (S_z); enquanto que os parâmetros funcionais foram calculados pela curva Abbot de acordo com a ISO 13565-2 (1996), sendo eles: profundidade da rugosidade do núcleo (S_k), altura reduzida do pico (S_{pk}) e profundidade reduzida do vale (S_{vk}).

2.4 Análises de molhabilidade e energia superficial

A molhabilidade da superfície das madeiras de eucalipto foi realizada nas primeiras 8 h após as operações de usinagem (lixamento e aplainamento) na direção longitudinal (paralelo às fibras). As análises de ângulo de contato foram realizadas pelo método da gota séssil com o goniômetro de imagem FTÁ D200 disponível no Laboratório de Física da Madeira no Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMUR) da Université Laval (Québec, QC, Canada). Este equipamento consiste no uso de uma câmera de vídeo com resolução de 640 x 480 pixels², que captura as imagens da gota para posterior análise. As análises das imagens geradas pela câmera, assim como a medição do ângulo de contato foram realizadas pelo programa FTA32.

Para as medições de ângulo de contato foram utilizados três líquidos testes de componentes de energia superficial conhecidos para cada amostra. Os líquidos polares usados foram água destilada e formamida, e o líquido não polar foi o diiodometano. As especificações das componentes de energia livre de superfície foram retiradas de Volpe e Siboni (1997). Uma gotícula (2 µL) de cada líquido de teste foi adicionada à superfícies usinada de cada amostra. As gotas foram colocadas no centro da amostra, com um espaço entre elas (evitando o contato da área de uma gota e outra) e imagens foram capturadas sistematicamente a cada 0,5 s durante 120 s para água destilada, 30 s para formamida e 15 s para diiodometano. A partir dessas imagens, o contorno da gota e o ângulo de contato médio (obtido a partir dos direito e esquerdo da gota) foram calculados pelo software FTA32 para cada ponto mensurado (ver Capítulo II, Figura 32).

O ângulo de contato médio de cada líquido teste foi utilizada para o cálculo das componentes de energia da superfície. As componentes de energia livre da superfície das madeiras foram determinadas pela teoria ácido-base de Good-van Oss-Chaudhury (VAN OSS 1988; GOOD, 1992). A energia livre da superfície foi calculada pelas Equações 8 e 9 (GINDL et al., 2004), que permitiram calcular o total da energia livre de superfície (γ_i), a componente dispersiva ou Lifshitz-van der Waals (γ^{LW}), a componente polar ou componente ácido-base de Lewis (γ^{AB}), a componente básica (γ^+) e a componente ácida (γ^-).

$$\gamma_i = \gamma_i^{LW} + \gamma_i^{AB} = \gamma_i^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad (8)$$

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 2 \left[\left(\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} \right) + \left(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} \right) + \left(\sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+} \right) \right] \quad (9)$$

2.5 Aplicação do verniz

A aplicação do verniz foi realizada em câmara de pintura com uma pistola pulverizadora da marca Kremlin-Graco disponível no Laboratório de Acabamentos da Madeira no Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMV) da Université Laval (Québec-QC, Canadá) nas primeiras 8 h após os processos de usinagem (lixamento e aplainamento).

Para cada tratamento de usinagem, foram aplicadas três camadas do verniz à base de água EX-3 Fini-tech 3000, em temperatura ambiente de acordo com as especificações do fabricante. A espessura do filme formado pelo revestimento em cada camada foi de 300 μm , sendo esta medida verificada com um auxílio de um gabarito. O tempo de cura do verniz entre a aplicação de uma camada e outra foi de 24 h. Após a secagem do revestimento, a superfície envernizada foi ligeiramente lixada com uma lixa de granulometria de 320, antes de receber uma nova camada. Antes e após a aplicação do verniz, as amostras foram mantidas em câmara climática (20°C e 65% UR) (Figura 41).

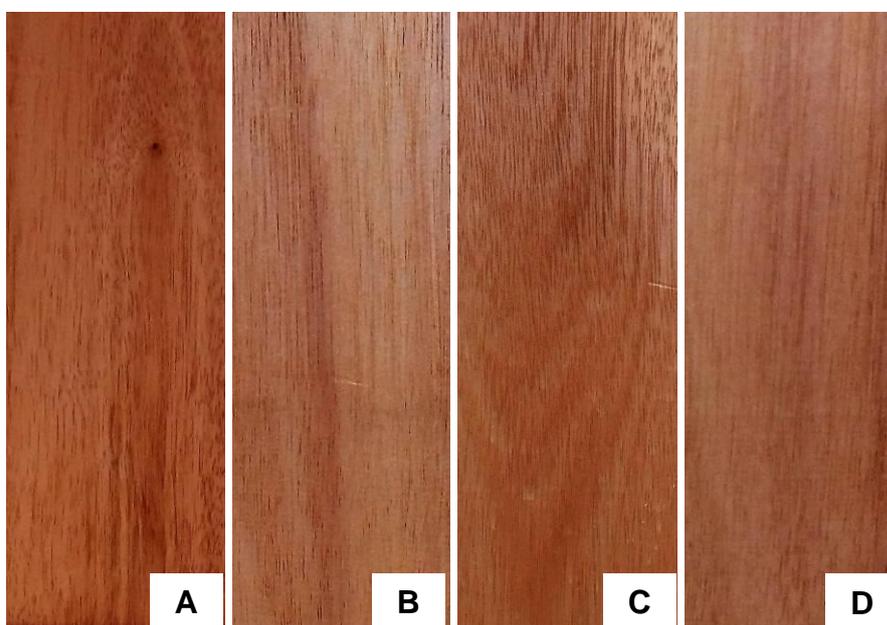


Figura 41. Aspecto visual das superfícies envernizadas das madeiras de eucalipto. (A) Superfície aplainada de *Eucalyptus robusta*. (B) Superfície lixada de *Eucalyptus robusta*. (C) Superfície aplainada de *Eucalyptus grandis*. (D) Superfície lixada de *Eucalyptus grandis*.

2.6 Teste de adesão do verniz

A adesão do verniz nas superfícies lixadas e aplainadas das madeiras de eucalipto foram avaliadas pelo teste de resistência à tração, também conhecido como teste de *pull-off*, segundo a norma ASTM D4541 (2002). O teste consiste em registrar a força de tração necessária para o arrancamento de pinos metálicos, de seção circular, com 20 mm de diâmetro colados à superfície da madeira utilizando uma máquina de ensaio universal MTS QTestTM/5 com velocidade constante de 1 mm/min (ver Capítulo II, Figura 35). Foi utilizado um pino por amostra para cada tipo de preparo da superfície. Para a colagem dos pinos, foi utilizada uma resina epóxi Lepage e tempo de cura de 24 h. Um sulco circular foi, em seguida, feito em torno dos pinos para evitar a propagação de falhas para fora da área ensaiada.

2.7 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas com o programa STATISTICA 7.0. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene a 95% de probabilidade. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) para as variáveis que atenderam os pressupostos da análise estatística e os testes de Tukey a 95% de probabilidade para a comparação entre as médias. O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney foi utilizado para as variáveis que não atenderam os pressupostos da ANOVA.

Para o presente estudo as variáveis dependentes estudadas foram: (i) parâmetros de rugosidade superficial 3D = S_a , S_q , S_v , S_z , S_p , S_k , S_{pk} e S_{vk} ; (ii) componentes de energia superficial = γ_s^{LW} , γ_s^{AB} , γ_s^+ e γ_s^- e (iii) variável de adesão = teste de resistência à tração (*pull-off*) visando avaliar o efeito do processo de usinagem (lixamento x aplainamento) para as duas espécies de eucalipto. A correlação entre as variáveis dependentes foi verificada pelas análises de Pearson.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rugosidade superficial 3D

A Tabela 13 apresenta os resultados das análises estatísticas dos parâmetros de rugosidade superficial 3D visando avaliar o efeito dos processos de usinagem (lixamento e aplainamento) das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*. A Tabela 14 apresenta as médias dos respectivos tratamentos de usinagem para os parâmetros de rugosidade 3D de ambas as madeiras.

Tabela 13. Resultados das análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de Z - Wilcoxon-Mann-Whitney) visando comparar o efeito dos processos de usinagem (lixamento x aplainamento) nos parâmetros de rugosidade superficial 3D das madeiras de eucalipto.

Espécie	Parâmetros de amplitude					Parâmetros funcionais		
	S _a	S _q	S _v	S _z	S _p	S _k	S _{pk}	S _{vk}
<i>Eucalyptus robusta</i>	[3,43]*	[5,44]*	[5,92]*	[5,26]*	0,27 ^{NS}	72,87*	13,66*	[6,12]*
<i>Eucalyptus grandis</i>	[4,18]*	[4,63]*	[4,52]*	[4,41]*	0,27 ^{NS}	14,58*	2,18 ^{NS}	[4,60]*

Variáveis dependentes: S_a = rugosidade média da superfície, S_q = rugosidade quadrática média, S_v = profundidade máxima dos vales, S_z = altura máxima do perfil, S_p = altura máxima dos picos, S_k = profundidade da rugosidade do núcleo, S_{pk} = altura reduzida dos picos e S_{vk} = profundidade reduzida dos vales. *Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} Não significativo. Valores entre colchetes = valor Z obtido pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Tabela 14. Média dos parâmetros de rugosidade superficial 3D das madeiras de eucalipto em função do processo de usinagem.

Espécie	Preparo da superfície	Parâmetros de amplitude (µm)				Parâmetros funcionais (µm)			
		S _a	S _q	S _v	S _z	S _p	S _k	S _{pk}	S _{vk}
<i>Eucalyptus robusta</i>	Lixada	0,5 b [494]	0,7 b [387]	2,9 b [362]	4,8 b [397]	2,2 (0,48)	1,5 a (0,20)	0,6 a (0,14)	0,9 b [351]
	Aplainada	1,2 a [832]	4,7 a [939]	45,8 a [964]	43,8 a [929]	2,1 (1,31)	0,1 b (0,23)	0,4 b (0,16)	7,3 a [975]
<i>Eucalyptus grandis</i>	Lixada	0,5 b [153]	0,8 b [141]	3,8 b [144]	5,7 b [147]	2,3 (0,76)	1,4 a (0,15)	0,5 (0,21)	1,4 b [142]
	Aplainada	2,6 a [375]	10,8 a [387]	91,6 a [384]	91,9 a [381]	2,1 (0,82)	1,1 b (0,29)	0,4 (0,14)	15,9 a [386]

Variáveis dependentes: S_a = rugosidade média da superfície, S_q = rugosidade quadrática média, S_v = profundidade máxima dos vales, S_z = altura máxima do perfil, S_p = altura máxima dos picos, S_k = profundidade da rugosidade do núcleo, S_{pk} = altura reduzida dos picos e S_{vk} = profundidade reduzida dos vales. Valores entre parêntesis = desvio padrão. Valores entre colchetes = média dos somatórios dos postos obtidos pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si (dentro de uma mesma espécie).

Parâmetros de amplitude

Os mapas 3D típicos da rugosidade superficial das madeiras de eucalipto para os dois processos de usinagem são apresentados nas Figuras 42 e 43. Os parâmetros S_a, S_q, S_v e S_z foram os responsáveis pela caracterização da textura da superfície das madeiras de eucalipto estudadas apresentando diferenças significativas entre os processos de usinagem (Tabela 13).

As superfícies aplainadas apresentaram maior rugosidade que as superfícies lixadas (Tabela 14). Comparada às superfícies lixadas, as superfícies aplainadas de ambas as espécies de madeira apresentaram vales mais profundos com valores de S_v de 45,8 μm para *Eucalyptus robusta* e 91,6 μm para *Eucalyptus grandis*. Estes resultados também podem ser visualizados no perfil típico de rugosidade 2D, onde observa-se que as superfícies aplainadas das duas espécies apresentam vales muito mais profundos que as superfícies lixadas (Figura 44). Os valores mais altos dos parâmetros S_a , S_q , S_v e S_z nas superfícies aplainadas estão relacionados com a maior quantidade de células com cavidades abertas e intactas, e ao nível de fibrilação provocado pelo processo de aplainamento (COOL; HERNÁNDEZ, 2011b). Este comportamento foi mais expressivo para as superfícies aplainadas de *Eucalyptus grandis*, madeira de maior rugosidade, quando comparada à madeira de *Eucalyptus robusta*. Cool e Hernández (2001b) relatam que o lixamento produz superfícies mais homogêneas, pois este processo altera a estrutura celular da superfície da madeira influenciando na rugosidade anatômica da madeira. Martins et al. (2011a) também mencionam que a incidência de vales menores nas superfícies lixadas deve-se às rachuras típicas geradas no processo de lixamento; entretanto, isso também pode ser causado pela presença de pó nas cavidades celulares.

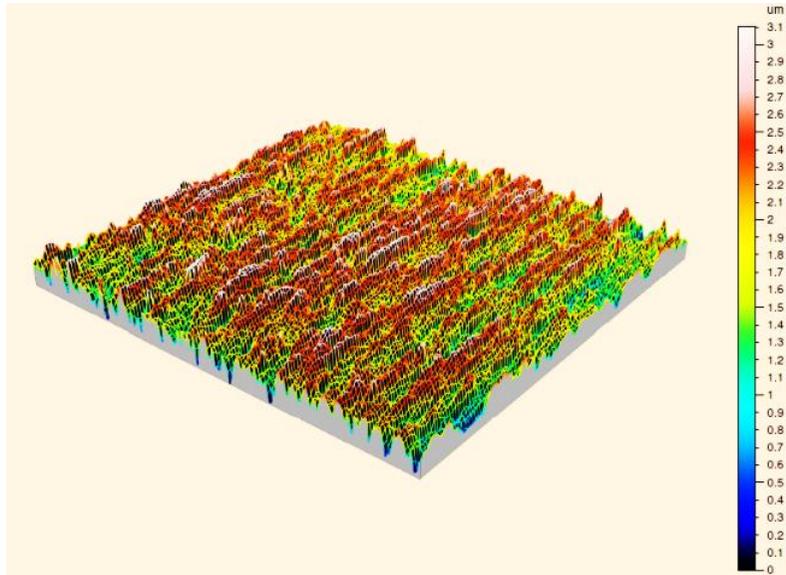
Parâmetros funcionais

As superfícies lixadas de *Eucalyptus robusta* apresentaram os maiores valores para os parâmetros S_k e S_{pk} quando comparadas às superfícies aplainadas. Para o parâmetro S_{pk} , conforme ocorreu para o parâmetro de amplitude S_p , o maior valor pode ser explicado pelo processo de usinagem aplicado. O lixamento foi caracterizado pela formação de picos maiores nas superfícies da madeira de *Eucalyptus robusta*, resultando, conseqüentemente nos maiores valores de S_{pk} (Tabela 14 e Figura 42). Alguns autores relacionam o parâmetro S_{pk} a formação de grã irregular no lixamento, isto poderia ter amplificado os picos causando o aumento desta variável (FUJIWARA et al., 2005; GURAU et al., 2005).

Para o parâmetro S_{vk} , assim como ocorreu para o parâmetro S_v , o lixamento atenuou a profundidade dos vales, sendo, portanto estes valores maiores e mais expressivos para as superfícies aplainadas, as quais são caracterizadas pela presença de vales mais profundos (Tabela 14; Figuras 42-44). Este parâmetro está relacionado ainda com as características anatômicas da madeira (FUJIWARA et al., 2005). A presença de lúmens abertos nas superfícies preparadas pelo aplainamento contribuiu para aumentar o parâmetro S_{vk} através do aumento da linha média do perfil de rugosidade (GURAU et al., 2005). Este resultado confirma ainda o fato do lixamento uniformizar as superfícies das madeiras de eucalipto e minimizar a influência da anatomia diminuindo, portanto o valor de S_{vk} (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006b).

Em geral os parâmetros de rugosidade S_a , S_q , S_v , S_z , S_p e S_{vk} tanto para as superfícies lixadas e aplainadas mostraram-se superiores para a espécie *Eucalyptus grandis*. Este fato pode estar relacionado com a estrutura anatômica do *Eucalyptus grandis*.

(A) Superfície lixada



(B) Superfície aplainada

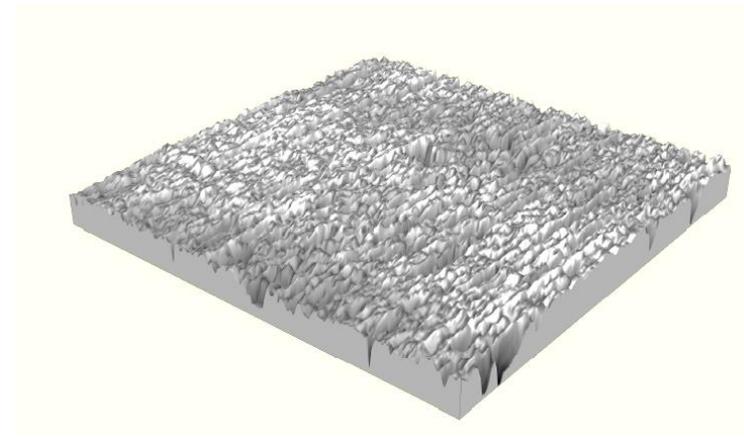
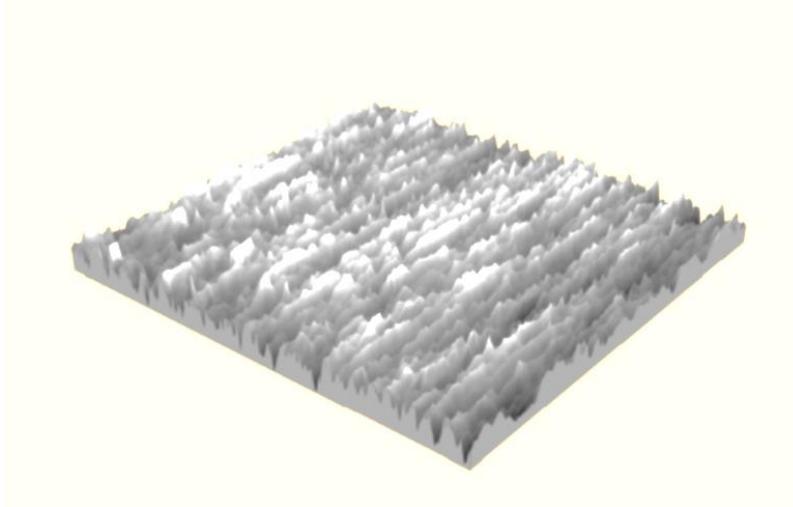
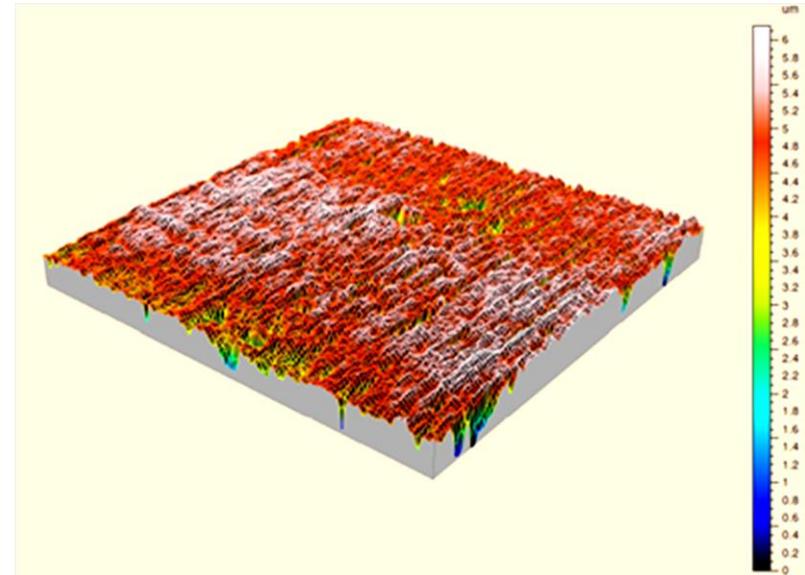
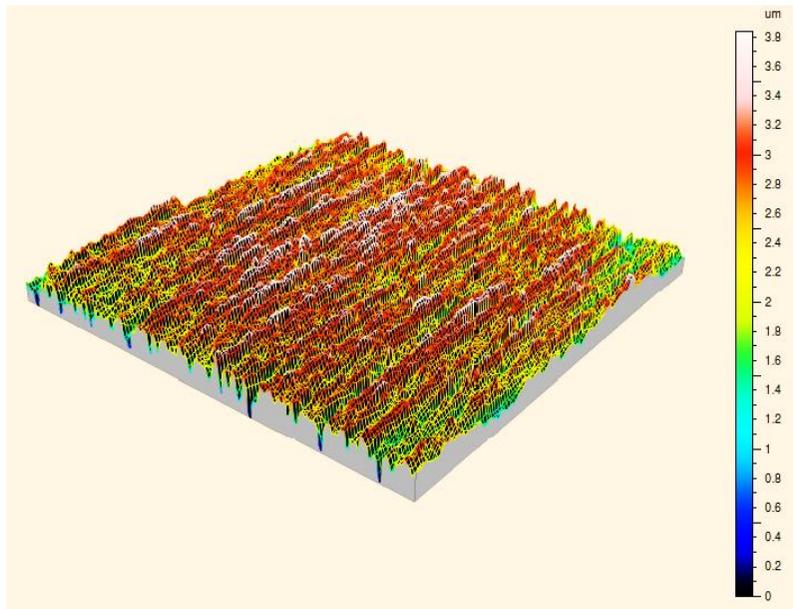


Figura 42. Mapa 3D da rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus robusta* para diferentes processos de usinagem.

(A) Superfície lixada



(B) Superfície aplainada

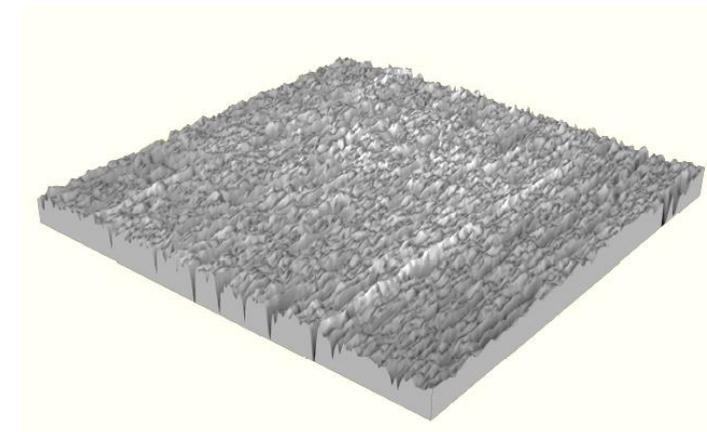
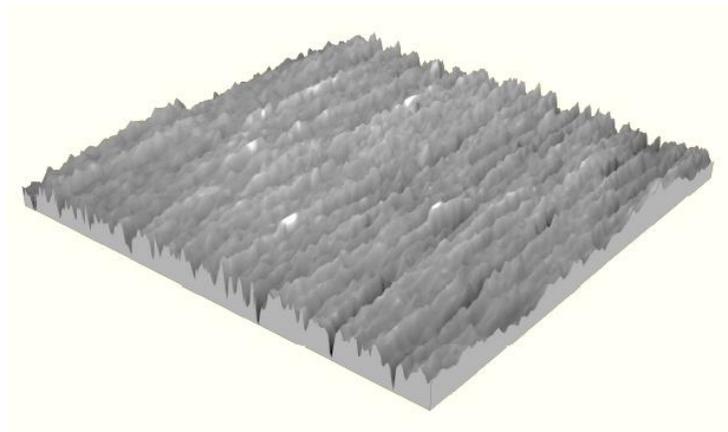
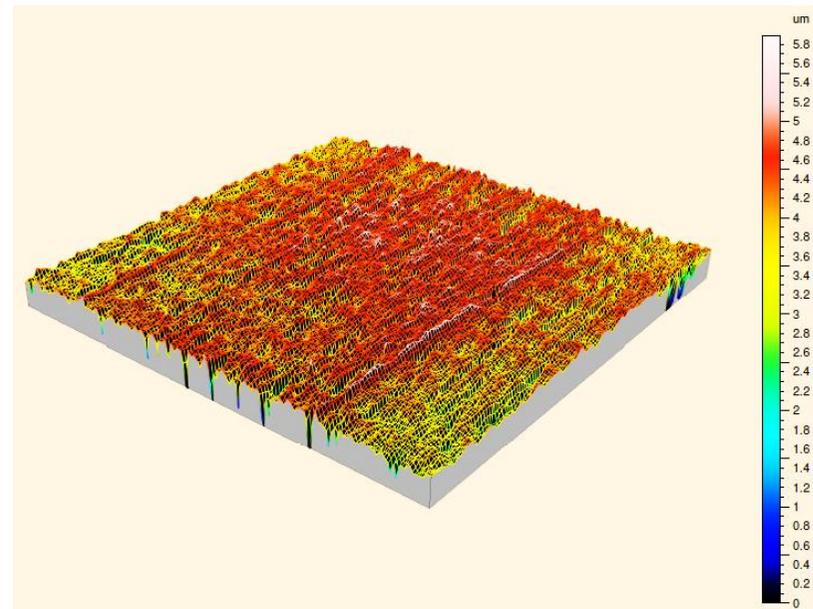
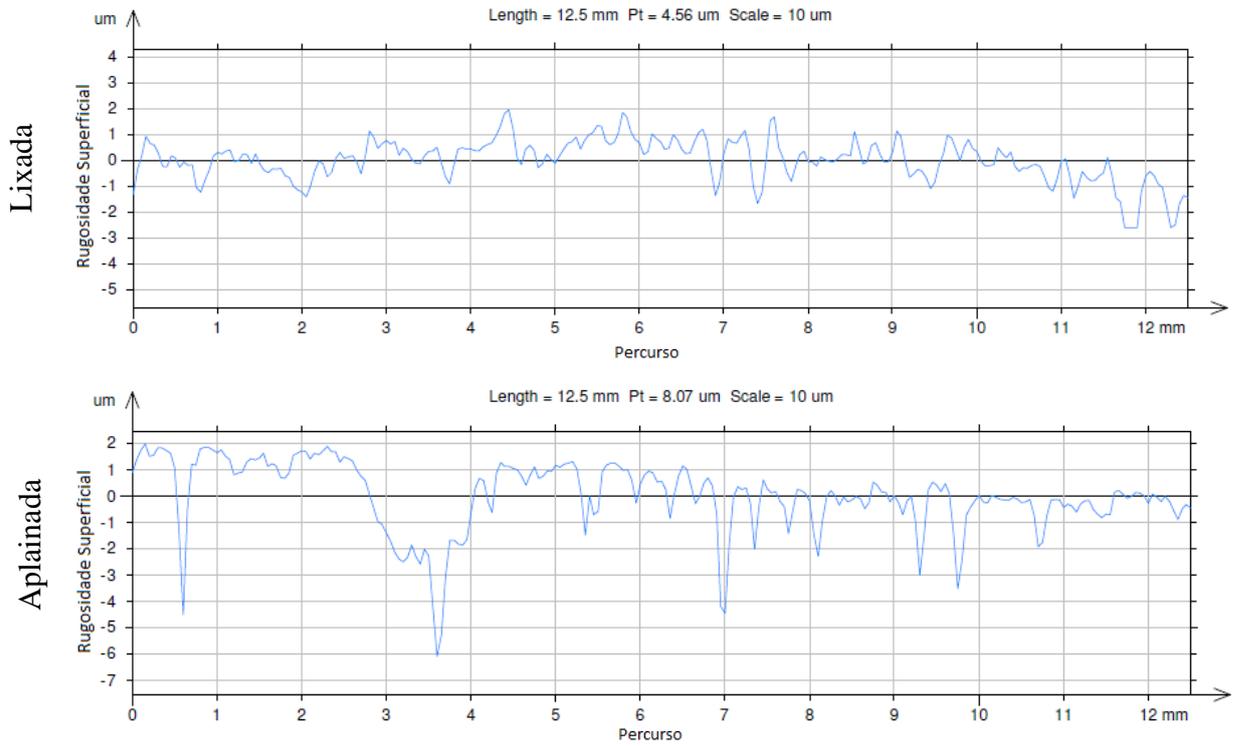


Figura 43. Mapa 3D da rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus grandis* para diferentes processos de usinagem.

(A) *Eucalyptus robusta*



(B) *Eucalyptus grandis*

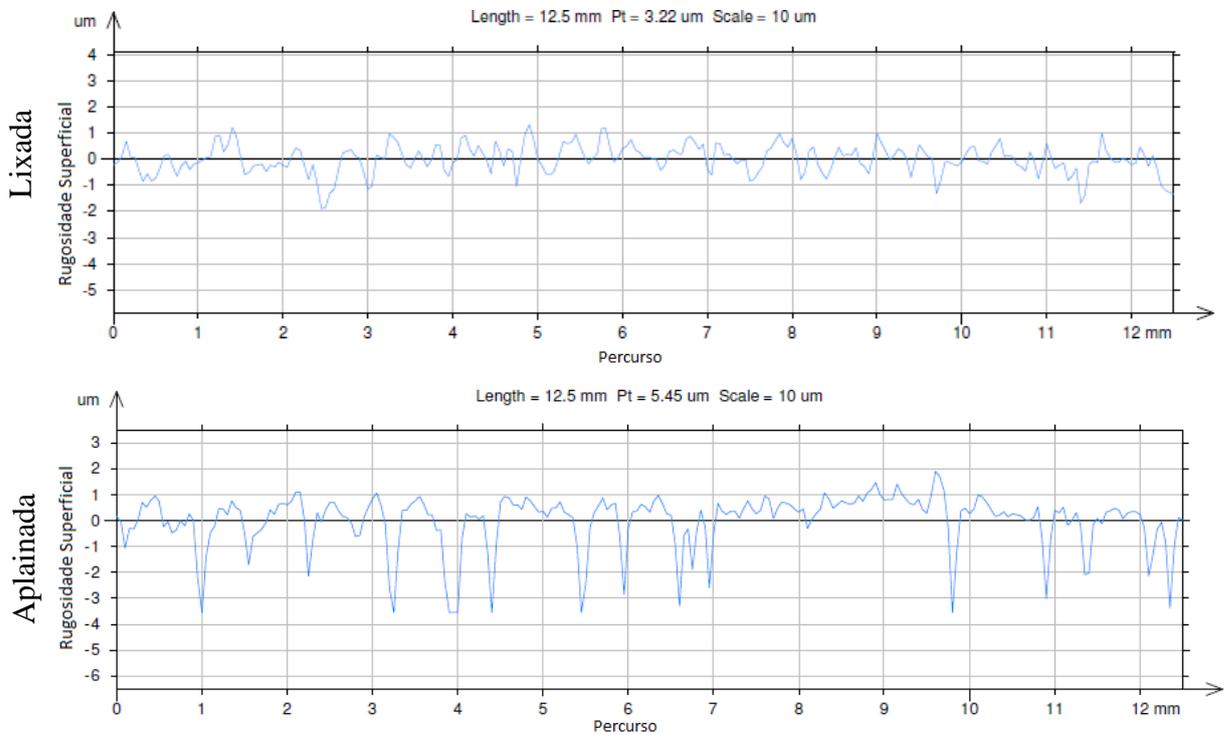


Figura 44. Perfil típico de rugosidade superficial 2D das madeiras de eucalipto para diferentes processos de usinagem.

3.2 Molhabilidade e energia superficial

O comportamento do ângulo de contato em função do tempo e do preparo da superfície da madeira das espécies de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* pode ser observado na Figura 45. As superfícies lixadas diferem das superfícies aplainadas para ambas as espécies. As superfícies lixadas de ambas as espécies de madeira apresentaram menores valores de ângulo de contato, conferindo uma maior molhabilidade, quando comparada às superfícies aplainadas. Em geral, as superfícies lixadas das madeiras de eucalipto ofereceram melhores condições de propagação e espalhamento da água, devido aos pequenos arranhões (ou ranhuras) formados na superfície pelo contato abrasivo dos grãos da lixa, acelerando, portanto a condução de água através da ação capilar. O alto nível de fibrilação produzida pelo lixamento altera a rugosidade da superfície; como resultado, o tempo necessário para um umedecimento completo foi consideravelmente menor para as superfícies lixadas do que em superfícies aplainadas (de MOURA; HERÁNDEZ, 2005; WEI et al., 2006; COOL; HERNÁNDEZ, 2011; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2015). Assim a rugosidade da superfície da madeira desempenha um papel fundamental nas propriedades de molhabilidade da superfície, as quais são amplamente influenciadas pelos processos de usinagem (MALDAS; KAMDEM, 1999; AYDIN et al., 2006; De MOURA; HERÁNDEZ, 2005; COOL; HERNÁNDEZ, 2011; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2015, 2016a, 2016b). O comportamento das superfícies lixadas e aplainadas, observado nos nossos resultados, corroboram com aquele observado por outros autores. De Moura e Hernández (2005) avaliaram o efeito do lixamento e do aplainamento na molhabilidade da madeira de *Acer saccharum* e, também observaram maior molhabilidade para as superfícies lixadas, os quais apresentaram uma absorção constante do líquido depositado. O dano celular causado pela lixa, assim como, a obstrução da madeira lixada seriam responsáveis por esse efeito. Comparando as duas espécies de eucalipto estudadas dentro de um mesmo processo de usinagem, observa-se valores muito próximos de molhabilidade (Figura 45).

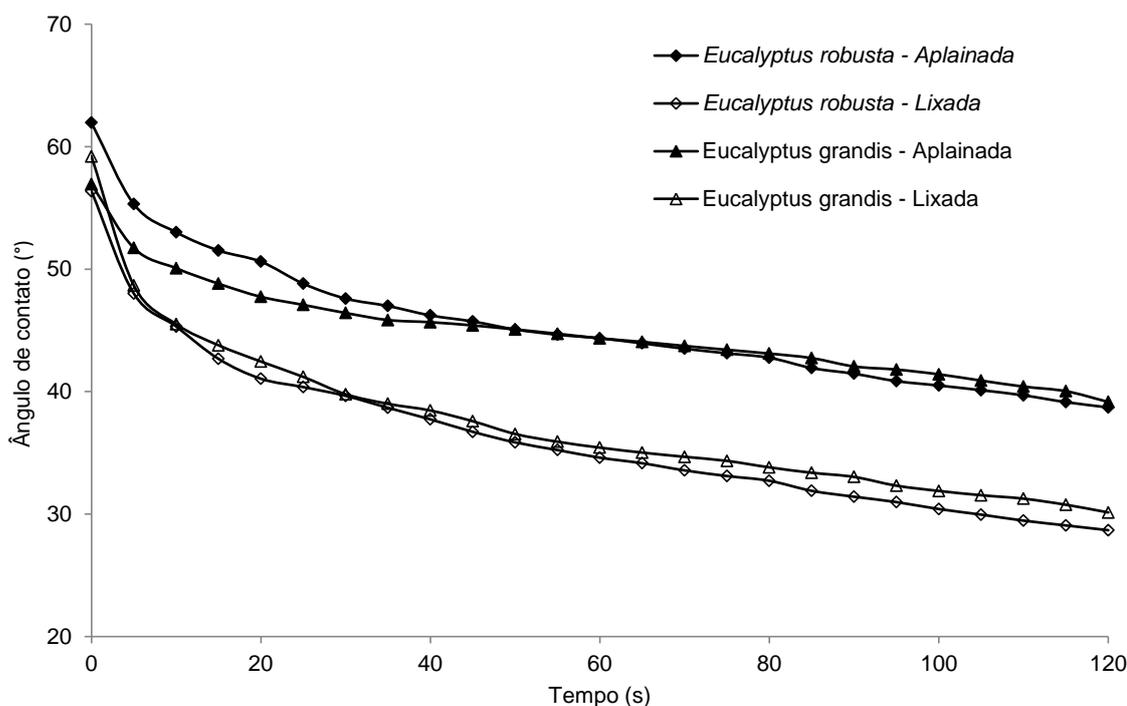


Figura 45. Comportamento do ângulo de contato nas superfícies lixadas e aplainadas das madeiras de eucalipto em função do tempo.

Os resultados das análises estatísticas para avaliar o efeito dos processos de usinagem (lixamento e aplainamento) nas componentes de energia superficial das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* encontram-se na Tabela 15. As médias das componentes de energia superficial para os diferentes processos de usinagem de ambas as espécies são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 15. Resultados das análises estatísticas (valor de F – ANOVA e valor de Z – Wilcoxon-Mann-Whitney) visando comparar o efeito dos processos de usinagem (lixamento x aplainamento) nas componentes de energia superficial das madeiras de eucalipto.

Espécie	Componentes da energia superficial (mJ/m ²)				
	γ_s	γ_s^{LW}	γ_s^{AB}	γ_s^+	γ_s^-
<i>Eucalyptus robusta</i>	[5,73]*	[5,76]*	0,16 ^{NS}	4,81*	3,63 ^{NS}
<i>Eucalyptus grandis</i>	[4,18]*	[3,92]*	0,32 ^{NS}	0,63 ^{NS}	2,22 ^{NS}

Variáveis dependentes: γ_s = energia superficial, γ_s^{LW} = componente dispersiva ou Lifshitz-van der Waals, γ_s^{AB} = componente polar ou componente ácido-base de Lewis, γ_s^+ = componente básica e γ_s^- = componente ácida. *Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} Não significativo. Valores entre colchetes = valor Z obtido pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Tabela 16. Médias da energia superficial em função do preparo da superfície para as madeiras de eucalipto.

Espécie	Preparo da superfície	Componentes da energia superficial (mJ/m ²)				
		γ_s	γ_s^{LW}	γ_s^{AB}	γ_s^+	γ_s^-
<i>Eucalyptus robustas</i>	Lixada	56,70 a [1002]	49,45 a [1004]	7,25 (0,36)	1,34 b (0,14)	9,98 (1,72)
	Aplainada	52,01 b [376]	44,82 b [374]	7,20 (0,59)	1,45 a (0,22)	9,09 (1,63)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Lixada	56,03 a [375]	48,64 [368]	7,39 (0,38)	1,38 (0,10)	10,0 (1,23)
	Aplainada	51,87 b [153]	44,61 [160]	7,26 (0,85)	1,44 (0,31)	9,37 (1,18)

Variáveis dependentes: γ_s = energia superficial, γ_s^{LW} = componente dispersiva ou Lifshitz-van der Waals, γ_s^{AB} = componente polar ou componente ácido-base de Lewis, γ_s^+ = componente básica e γ_s^- = componente ácida. Valores entre parêntesis = desvio padrão. Valores entre colchetes = média dos somatórios dos postos obtidos pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si (dentro de uma mesma espécie).

A maior energia superficial (γ_s), assim como, ocorreu para a molhabilidade foi encontrada para as superfícies lixadas de ambas as espécies estudadas. As superfícies lixadas das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* apresentaram uma energia superficial de 56,70 mJ/m² e 56,03 mJ/m², respectivamente (Tabela 16). Os resultados das demais componentes de energia superficial mostraram que a componente apolar (γ_s^{LW}) também apresentou maiores valores para as superfícies lixadas para ambas as espécies. De acordo com Garnier e Glasser (1996), o alto valor desta componente está associado principalmente à presença e à concentração de grupos de hidroxilas (OH⁻) livres na superfície. O lixamento ocasionou danos celulares na superfície e estes danos podem ter ocasionado um aumento da quantidade, bem como, um aumento das áreas disponíveis dos grupos OH⁻ expostas na superfície, levando então o aumento do valor dessa componente.

Para as componentes ácidas (γ_s^+) e básicas (γ_s^-), observamos que a componente ácida apresentou valores muito mais elevados do que aqueles da componente básica independente do processo de usinagem ou da espécie de madeira (Tabela 16). Isto indica, que estas superfícies têm maior capacidade de interações polares com materiais mais ácidos no processo de adesão. Entretanto, para a superfície aplainada da madeira de *Eucalyptus robusta*, observa-se para a componente básica (γ_s^-) uma contribuição maior das interações polares com materiais mais básicos no processo de adesão.

O processo de lixamento não altera apenas a rugosidade da madeira, mas também os componentes químicos da superfície, ou seja, o ângulo de contato e a energia superficial (EL ABED et al., 2012; QIN et al., 2015). Estes resultados estão de acordo com outros autores (SINN et al., 2004; de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005, 2006b; COOL; HERNÁNDEZ, 2011; QIN et al., 2015; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016a, 2016b) os quais observaram ângulos de contato menores indicando boa molhabilidade e maior energia superficial após o lixamento da madeira.

3.3 Adesão da madeira

Os resultados de resistência à tração (*pull-off*) nas superfícies lixadas e aplainadas das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* são apresentados na Tabela 17. Entretanto, foram encontradas diferenças significativas entre os processos de usinagem (lixamento x aplainamento) apenas para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Em geral, observa-se para ambas as espécies valores superiores de resistência à tração para as superfícies aplainadas quando comparadas com as superfícies lixadas, entretanto, somente a madeira de *Eucalyptus grandis* mostrou diferenças significativas entre os processos de usinagem. O maior valor de resistência a tração para as superfícies aplainadas das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* pode estar associada à rugosidade da superfície, a qual influencia na sua capacidade em receber um produto de acabamento. O aumento da rugosidade da superfície pode explicar a melhor adesão das superfícies mais ásperas, devido à maior superfície de contato entre o substrato e o revestimento, aumentando assim a ancoragem mecânica e a aderência resultante (de MOURA; HERNÁNDEZ 2005, 2006a, 2006b; COOL; HERNÁNDEZ, 2011; UGULINO; HERNÁNDEZ, 2016a, 2016b).

Tabela 17. Médias de resistência à tração (*pull-off*) em função do preparo da superfície após envernizamento para as madeiras de eucalipto.

Espécie	Preparo da superfície	Resistência à tração (MPa)	Valor de F - Anova	Valor de Z - Wilcoxon-Mann-Whitney
<i>Eucalyptus robusta</i>	Lixada	3,36 (1,51)	0,20 ^{NS}	-
	Aplainada	3,51 (0,20)		
<i>Eucalyptus grandis</i>	Lixada	2,09 [154] b	-	4,25*
	Aplainada	2,59 [318] a		

^{NS} Não significativo. * Significativo a 95% de probabilidade. Valores entre parêntesis = desvio padrão. Valores entre colchetes = média dos somatórios dos postos obtidos pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si (dentro de uma mesma espécie).

Nas imagens 2D da superfícies das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*, observa-se que as superfícies lixadas apresentam ranhuras típicas ocasionadas pela ação abrasiva do lixamento e que os lúmens celulares estão preenchidos pelo pó gerado durante o processo, o que ocasionou uma diminuição na adesão e penetração do revestimento (Figura 46). Para as superfícies aplainadas foi visualizada uma quantidade maior de fendas e

células com cavidades abertas, principalmente vasos, os quais promoveram maior facilidade de penetração do adesivo, auxiliando na colagem da madeira (Figura 47) (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2005; MARTINS et al., 2011a).

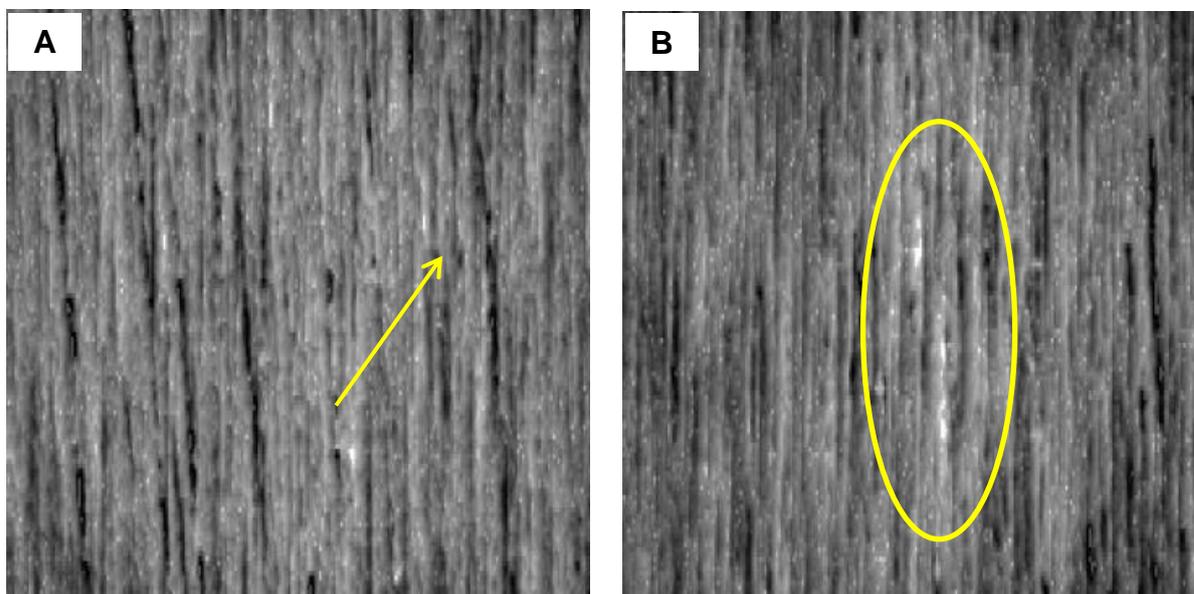


Figura 46. Imagens 2D das superfícies lixadas das madeiras de eucalipto obtidas pelo software Mountain Map. (A) *Eucalyptus robusta* com presença de ranhuras típicas do processo de lixamento. (B) *Eucalyptus grandis* com presença de pó nos lúmens celulares e nas ranhuras (áreas esbranquiçadas).

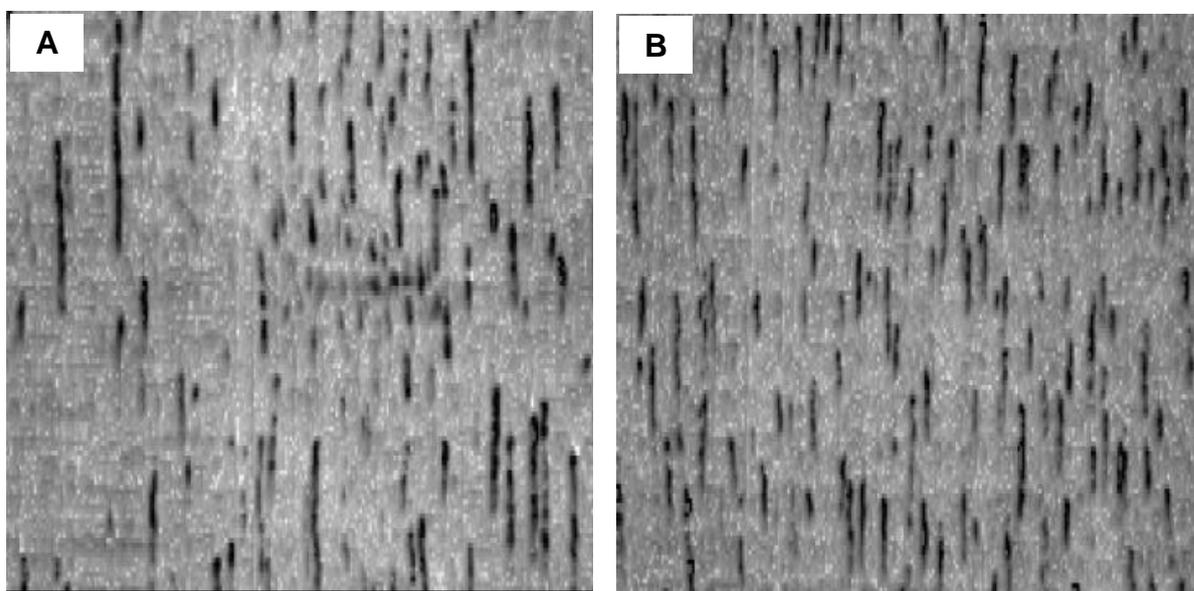


Figura 47. Imagens 2D das superfícies aplainadas das madeira de eucalipto obtidas pelo software Mountain Map mostrando a ausência de ranhuras. (A) *Eucalyptus robusta* com presença de cavidades celulares e células abertas. (B) *Eucalyptus grandis* com cavidades celulares.

3.4 Correlação entre rugosidade 3D, molhabilidade, energia superficial e adesão

Os resultados das análises de correlação entre os parâmetros de rugosidade 3D, energia superficial, molhabilidade e resistência à tração das madeiras de eucalipto são apresentadas na Tabela 18.

Correlações significativas e negativas foram observadas entre os parâmetros de rugosidade (S_a , S_q , S_v , S_z e S_{vk}) e a energia superficial, indicando que quanto maior a rugosidade das superfícies das madeiras de eucalipto menor sua a energia superficial, entretanto para o parâmetro S_k houve uma correlação positiva. Os parâmetros de rugosidade S_a , S_q , S_v e S_z também apresentaram uma correlação significativa e positiva com a resistência à tração, ou seja, quanto maior a rugosidade maior será a resistência à tração das madeiras de eucalipto.

A molhabilidade apresentou uma correlação significativa e positiva com a rugosidade apenas para o parâmetro S_p . A energia superficial apresentou uma correlação significativa com a molhabilidade, indicando que quanto maior a molhabilidade maior a energia superficial da madeira. Entretanto, não foram encontradas correlações significativas entre a adesão e as propriedades de molhabilidade e energia superficial.

Esses resultados indicam que a molhabilidade e a energia superficial não são os melhores indicadores da qualidade de aderência do verniz para os processos de usinagem e para as espécies de madeira estudadas. As superfícies lixadas apresentaram a maior molhabilidade e maior energia superficial mas isso não resultou na maior aderência do verniz. Isso pode ser explicado, pelo fato da gota se espalhar com maior facilidade nas superfícies lixadas, entretanto, a presença de pó nas cavidades celulares dificulta a penetração de líquidos, assim, a gota se espalha diminuindo o ângulo mas não penetra nas cavidades celulares desfavorecendo a adesão. Outros autores também encontraram resultados similares (de MOURA; HERNÁNDEZ, 2006a). De Moura e Hernández (2006a) observaram que o efeito da molhabilidade e da energia superficial na adesão de revestimentos para a madeira de *Acer saccharum* Marsh. foi menor que aquele da rugosidade. Assim, recomenda-se que novos estudos sejam realizados para investigar melhor a relação entre molhabilidade/energia superficial e adesão de revestimentos para diferentes espécies.

Tabela 18. Correlação entre os parâmetros de rugosidade 3D, energia superficial, molhabilidade e resistência à tração das madeiras de eucalipto.

Variáveis	Energia superficial	Molhabilidade	Resistência à tração
S_a	-0,36*	0,20 ^{NS}	0,24*
S_q	-0,37*	0,26*	0,25*
S_v	-0,39*	0,05 ^{NS}	0,28*
S_z	-0,36*	-0,05 ^{NS}	0,25*
S_p	-0,15 ^{NS}	-0,20 ^{NS}	-0,18 ^{NS}
S_k	0,59*	-0,17 ^{NS}	-0,16 ^{NS}
S_{pk}	0,21 ^{NS}	-0,11 ^{NS}	-0,13 ^{NS}
S_{vk}	-0,39*	-0,21 ^{NS}	-0,19 ^{NS}
Molhabilidade	0,54*	-	-
Resistência à tração	-0,03 ^{NS}	-0,04 ^{NS}	-

Parâmetros de rugosidade 3D: S_a = rugosidade média da superfície, S_q = rugosidade quadrática média, S_v = profundidade máxima dos vales, S_z = altura máxima do perfil, S_p = altura máxima dos picos, S_k = profundidade da rugosidade do núcleo, S_{pk} = altura reduzida dos picos e S_{vk} = profundidade reduzida dos vales. *Significativo a 95% de probabilidade. ^{NS} não significativo.

4 CONCLUSÕES

O processo de usinagem afetou significativamente a rugosidade superficial das madeiras de eucalipto. O aplainamento das superfícies das madeiras de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* aumentou a rugosidade superficial com maiores valores para os parâmetros de amplitude S_a , S_q , S_v e S_z quando comparado ao lixamento.

O parâmetro S_k mostra que o lixamento produziu superfícies mais uniformes que o aplainamento, ocasionando uma diminuição da influência da estrutura anatômica, descrevendo melhor este processo de usinagem.

O lixamento atenuou a profundidade dos vales (S_{vk}) das madeiras estudadas, mas, por outro lado, aumentou a quantidade de picos (parâmetro S_{pk}) na madeira de *Eucalyptus robusta* devido às ranhuras características produzidas por este processo de usinagem.

As superfícies lixadas apresentaram a melhor molhabilidade e a maior energia superficial.

As superfícies aplainadas de *Eucalyptus robusta* apresentaram um maior valor para a componente básica (γ_s^+) que as superfícies lixadas, contribuindo assim para maiores interações polares com materiais mais básicos no processo de adesão.

O processo de usinagem afetou somente a aderência do verniz na superfície da madeira de *Eucalyptus grandis* com maior resistência à tração (*pull-off*) na superfície aplainada.

As superfícies das madeiras de eucalipto com maior rugosidade apresentaram menor molhabilidade, menor energia superficial e maior resistência a adesão, mostrando que a rugosidade apresenta um impacto mais importante na aderência do verniz que a energia superficial.

A molhabilidade e a energia superficial não foram bons indicadores da qualidade de adesão do revestimento nas superfícies usinadas das madeiras de eucalipto estudadas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4541**: Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. Philadelphia, 2002.

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

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G.; COLAK, S.; DEMIRKIR, C. Effects of moisture content on formaldehyde emission and mechanical properties of plywood. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1311-1316, 2006.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. **Quality of Machined Wood Surfaces**. Basel, Switzerland: Springer International Publishing. 265p. 2015.

COOL, J.; HERNÁNDEZ, R. E. Improving the sanding process of black spruce wood for surface quality and water-based coating adhesion. **Forest Products Journal**, v. 61, p. 372-380, 2011a.

COOL, J.; HERNÁNDEZ, R. E. Evaluation of four surfacing methods on black spruce wood in relation to poly (vinyl acetate) gluing performance. **Wood and Fiber Science**, v. 43, n. 2, p. 194-205, 2011b.

FREITAS, S. V. C.; DOMINGOS, F. C.; MACHADO, V. N. Análise Metrológica de Rugosímetros. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA, 3º, 2014, Gramado. **Anais...** Gramado: 3º CIMMEC, 2014.

DE MEIJER, M.; HAEMERS, S.; COBBEN, W.; MILITZ, H. Surface energy determinations of wood: Comparison of methods and wood species. **Langmuir**, v. 16, n. 24, p. 9352-9359, 2000.

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

DE MOURA, L. F.; HERNÁNDEZ, R. E. Effects of abrasive mineral, grit size and feed speed on the quality of sanded surfaces of sugar maple wood. **Wood Science and Technology**, v. 40, p. 517-530, 2006a.

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, p. 130-136, 2006b.

EL ABED, S.; IBNSOUDA, K. S.; LATRACHE, H.; BOUTAHARI, S. Theoretical effect of cedar wood surface roughness on the adhesion of conidia from *Penicillium expansum*. **Annals of Microbiology**, v. 62, n. 4, p. 1361-1366, 2012.

- FUJIWARA, Y.; FUJII, Y.; OKUMURA, S. Relationship between roughness parameters based on material ratio curve and tactile roughness for sanded surfaces of two hardwoods. **Journal of Wood Science**, v. 51, n. 3, p. 274-277, 2005.
- GARDNER, D. J.; GENERALLA, N. C.; GUNNELLS, D. W.; WOLCOTT, M. P. Dynamic wettability of wood. **Langmuir**, v. 7, n. 11, p. 2498-2502, 1991.
- GARDNER, D. J.; WOLCOTT, M. P.; WILSON, L.; HUANG, Y.; CARPENTER, M. Our understanding of wood surface chemistry in 1995. Proceedings N^o.7296. **Wood Adhesives**. Forest Product Society, Madison, WI. p. 29-36, 1995.
- GARNIER, G.; GLASSER, W. G. Measuring the surface energies of spherical cellulose beads by inverse gas chromatography. **Polymer Engineering & Science**, v. 36, n. 6, p. 885-894, 1996.
- GINDL, M.; SINN, G.; REITERER, A.; TSCHEGG, S. Wood surface energy and time dependence of wettability: A comparison of different wood surfaces using an acid-base approach. **Holzforschung**, v. 55, p. 433-440, 2001a.
- GINDL, M.; SINN, G.; GINDL, W.; REITERER, A.; TSCHEGG, S. A comparison of different methods to calculate the surface free energy of wood using contact angle measurements. **Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 181, p. 279-287, 2001b.
- GINDL, M.; TSCHEGG, S. Significance of the acidity of wood to the surface free energy components of different wood species. **Langmuir**, v. 18, n. 8, p. 3209-3212, 2002.
- GINDL, M.; REITERER, A.; SINN G.; STANZL-TSCHEGG, S. E. Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 62, n. 4, p. 273-280, 2004.
- GOOD, R. J. Contact angle, wetting, and adhesion: A critical review. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 6, p. 1269-1302, 1992.
- GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Processing roughness of sanded wood surfaces. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 63, n. 1, 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.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13565-2**: Geometrical Product Specifications (GPS). Surface Texture. Profile Method; Surfaces having stratified functional properties. Part 2: Height characterisation using the linear material ratio curve. London. 1996.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16610-31**: Geometrical product specifications (GPS) – Filtration part 31: robust profile filters. Gaussian regression filters, London. 2002.

JANKOWSKA, A.; ZBIEC, M.; KOZAKIEWICZ, P.; KOCZAN, G.; OLENSKA, S.; BEER, P. The wettability and surface free energy of sawn, sliced and sanded european oak wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 3, p. 443-454, 2018.

JAKUB, S; MARTINO, N. **Wood surface roughness–what is it?** Proc IWMS, v. 17, p. 242-250, 2005.

KILLIC, M.; SALIM, H.; BURDURLU, E.: Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, v. 41, p. 1074-1078, 2006.

KÚDELA, J.; KURJATKO, S. **Wood Structure and Properties'02**. Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, 221p. 2002.

LIPTÁKOVÁ, E.; KÚDELA, J.; BASTL, Z.; SPIROVOVÁ, L. Influence of mechanical surfasse treatment of wood on the wetting process. **Holzforschung**, v. 49, p. 369-375, 1995.

LIU, F. P.; RIALS, T. G.; SIMONSEN, J. Relationship of wood surface energy to surface composition. **Langmuir**, v. 14, n. 2, p. 536-541, 1998.

MALDAS, D. C.; KAMDEN, D. P Wettability of Extracted Southern Pine. **Forest Products Journal**, v. 49, n. 11/12, p. 91-93, 1999.

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*. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 135-143, 2011.

QIN, Z.; CHEN, H.; GAO, Q.; ZHANG, S.; LI, J. Wettability of sanded and aged fast-growing poplar wood surfaces: I. surface free energy. **BioResources**, v. 10, n.1, p.1008-1023, 2015.

SADOH, T.; NAKATO, K. Surface properties of wood in physical and sensory aspects. **Wood Science and Technology**, v. 21, p. 111–120, 1987.

SANDAK, J.; TANAKA, C. Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor 1: effect of wood species. **Journal of Wood Science**, v. 49, n. 4, p. 305-311, 2003.

SINN, G.; GINDL, M.; REITERER, A.; STANZL-TSCHEGG, S. Changes in the surface properties of wood due to sanding. **Holzforschung**, v. 58, n. 3, p. 246-251, 2004.

TAN, P. L.; SHARIF, S.; SUDIN, I. Roughness models for sanded wood surfaces. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 129-142, 2012.

TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. **Forest Products Journal**, v. 49, n. 5, p. 41-46, 1999.

UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R. E. Effects of four surfacing methods on surface properties and coating performance of red oak wood. **Proceedings** of the XXII International Wood Machining Seminar June 14-17, 2015 Quebec City, Canada.

UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R. E. Analysis of sanding parameters on surface properties and coating performance of red oak wood. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-9, 2016a.

UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R. E. Assessment of surface properties and solvent-borne coating performance of red oak wood produced by peripheral planing. **European Journal of Wood and Wood Products**, p. 1-13, 2016b.

VAN OSS, C. J.; GOOD, R. J.; AND CHAUDHURY, M. K. Additive and nonadditive surface tension components and the interpretation of contact angles. **Langmuir**, v. 4, n. 4, p. 884-891, 1988.

VOLPE, C. D.; SIBONI, S. Some reflections on acid–base solid surface free energy theories. **Journal Colloid Interface Science**, v. 195, n. 1, p. 121-136, 1997.

WÅLINDER, M. E. P.; STROM, G. Measurement of wood wettability by the Wilhelmy method - Part 2. Determination of apparent contact angles. **Holzforschung**, v. 55, n. 1, p. 33-41, 2001.

WÅLINDER, M. E. P. Study of Lewis acid-base properties of wood by contact angle analysis. **Holzforschung**, v. 56, n. 4, p. 363-371, 2002.

CONCLUSÕES GERAIS

A primeira parte da tese foi dedicada ao estudo da alteração da cor e da inativação da superfície em função do tempo de envelhecimento e suas correlações para sete espécies de eucalipto: *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. A partir dos resultados, concluiu-se:

- as madeiras de eucalipto apresentaram três classes de densidade: muito alta (*Corymbia citriodora*), alta (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla*) e baixa (*Eucalyptus grandis*); e dois grupos de cor: amareladas (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis*) e avermelhadas (*Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*);

- o tempo de envelhecimento causou a diminuição da luminosidade (L^*) e o aumento da cromaticidade, assim como, a redução da molhabilidade das madeiras de eucalipto.

A segunda parte da tese avaliou o desempenho do verniz em três espécies de eucalipto (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita*) e suas correlações com a molhabilidade da superfície em função do tempo transcorrido entre o aplainamento e o envernizamento. Os resultados permitiram concluir que:

- o ângulo de contato médio aumenta em função do tempo de envelhecimento;

- as superfícies recém-usinadas apresentaram melhor adesão do verniz que as superfícies envelhecidas, indicando a inativação da superfície provocada provavelmente pela migração dos extrativos para a superfície, uma vez que, as espécies de eucalipto estudadas apresentam altos teores de extrativos;

- a resistência à tração e a molhabilidade da madeira de *Corymbia citriodora* apresentaram correlação significativa e negativa, mostrando que o tempo de envelhecimento diminui a molhabilidade, e conseqüentemente a aderência ao verniz. Nenhuma correlação foi observada entre essas variáveis para as duas outras espécies, mostrando, que essa correlação depende das características de cada espécie.

A terceira parte da tese visou estudar o efeito do processo de usinagem (lixamento e aplainamento) na rugosidade 3D, na molhabilidade, na energia superficial e na aderência do verniz de duas madeiras de eucalipto: *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis*. A partir dos resultados concluiu-se que:

- o aplainamento produziu superfícies mais rugosas para as duas espécies estudadas quando comparados ao lixamento, com maiores valores para os parâmetros de amplitude S_a , S_q , S_v e S_z ;

- o lixamento produziu superfícies mais uniformes que o aplainamento, este processo ocasiona uma diminuição da influência anatômica, sendo indicado pelo parâmetro S_k ;

- as superfícies lixadas apresentaram maior molhabilidade e maior energia superficial, devido ao lixamento favorecer a propagação e o espalhamento da água na superfície através das ranhuras produzidas pelo contato abrasivo dos grãos da lixa;

- o processo de usinagem afetou somente a aderência do verniz na superfície da madeira de *Eucalyptus grandis*. A maior rugosidade causada pelo aplainamento produz uma área de contato maior entre o substrato e o revestimento, aumentando assim a ancoragem mecânica e a aderência resultante;

- as superfícies das madeiras de eucalipto com maior rugosidade apresentaram menor molhabilidade, menor energia superficial e maior resistência à adesão;

- a rugosidade superficial apresenta maior influência na aderência do verniz do que na energia superficial;

- a molhabilidade e a energia superficial não foram bons indicadores da qualidade de adesão do revestimento nas superfícies usinadas das duas madeiras de eucalipto estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

AGOSTINETTO, D.; TAROUCO, C. P.; MARKUS, C.; OLIVEIRA, E.; SILVA, J. M. B. V.; TIRONI, S. P. Seletividade de genótipos de eucalipto a doses de herbicidas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 3, p. 585-598, 2011.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 509-516, 2010.

ALLEN, W. K. **Theories of adhesion**. In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 638p. 2005a.

ALLEN, W. K. **Mechanical theory of adhesion**. In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 638p. 2005b.

ALVES, M. C. de S.; GONÇALVES, M. T. T.; VARASQUIM, F. M. F. de A.; SANTIAGO, L. F. F.; VARANDA, L. D.; BIANCHI, E. C. Análise da influência da velocidade de corte, da granulometria da lixa e da pressão específica de corte no processo de lixamento. VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. **Anais...**Paraíba: 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2395-93**: Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Philadelphia, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4541**: Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. Philadelphia, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTANDAS-FLORESTAR, 2015. Disponível em: <http://www.floresta.org.br>. Acessado em: 25 de maio de 2015.

ATAYDE, C. M.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de Muirapiranga (*Brosimum sp.*). **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 231-235, 2011.

ATKINS, P. W. **Físico-Química**. 7 ed. Rio de Janeiro, BRJ: Livros técnicos e científicos, v.1, 2003.

AUCLAIR, N. **Stabilité des couleurs des systèmes bois/vernis améliorée par les revêtements nanocomposites aqueux à usage extérieur**. Mémoire de maîtrise en sciences du bois, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec (Québec). 2010.

AYDIN, I. Activation of wood surfaces for glue bonds by mechanical pre-treatment and its effects on some properties of veneer surfaces and plywood panels. **Applied Surface Science**, v. 233, n. 1-4, p. 268-274, 2004.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 2, p.430-440, 2005.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G.; COLAK, S.; DEMIRKIR, C. Effects of moisture content on formaldehyde emission and mechanical properties of plywood. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1311-1316, 2006.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: Silvicultura. **Anais do 4º Congresso Florestal Brasileiro**. São Paulo/SP, v. 8, n. 28, p. 726-731, 1983.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira**. Piracicaba: ESALQ, 125 p, 1985.

BERG, J. C. **Role of acid-base interactions in wetting and related phenomena**. In: **Wettability**. New York: Marcel Dekker, p. 75-148, 1993.

BERTOLA, A. **Eucalipto - 100 Anos de Brasil: “Falem mal, mas continuem falando de mim!”**. V&M Florestal Ltda, Curvelo - MG, 91 p. 2013.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00077114. 2017.

BIAZZON, J. C. **Influência da velocidade de avanço no aplainamento da madeira sobre o desempenho de colagem com adesivo à base de poliacetato de vinila**. 177 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016.

BOEHME C.; HORA, G. Water absorption and contact angle measurement of native European, North American and tropical wood species to predict gluing properties. **Holzforschung**, v. 50, n. 3, p. 269-276, 1996.

BONDUELLE, A.; CRUZ, C. R. da; SILVA, J. R. M. *Processo mecânico da madeira*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002. 26p (Notas de aula).

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

BRAGA, P. P. C. **Qualidade na usinagem e no acabamento da madeira de *Coffea arabica***. 88p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

BURDURLU E.; USTA I.; ULUPINAR M.; AKSU B.; ERARSLAN Ç. The effect of the number of blades and grain size of abrasives in planing and sanding on the surface roughness

of European black pine and Lombardy poplar. **Turkish Journal of Agriculture & Forestry**, v. 25, p. 315-321, 2005.

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Natural weathering performance of three fast-growing eucalypt woods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 4, p. 799-808, 2015.

ÇAKICIER, N.; KORKUT, S.; KORKUT, D. S.; KURTOGLU, A.; ERDINLER, S.; ULAY, G. The effects of protective dye layer applied on varnish layer hardness, scratch resistance and glossiness of various blockboard types. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 10, p. 2303-2308, 2011.

CAMARGO, R. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara D'Oeste: SENAI. 2002.

CARRANO, A. L.; TAYLOR, J. B.; LEMASTER, R. L. Machining-induced subsurface damage of wood. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 1, p. 85-91, 2004.

CERCHIARI, A. M. F.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. Avaliação de produtos para a impermeabilização da madeira, **Cerne**, v. 16, p. 1-8, 2010.

CHAN, C. M. **Polymer Surface Modification and Characterization**. New York: Hanser, 1994.

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

CHRISTIANSEN, A. W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: A critical review of the literature, Part II: Chemical reactions. **Wood Fiber Science**, v. 23, n. 1, p. 69-84, 1991.

COELHO, C. **Influence de l'usinage du bois sur les caractéristiques objectives et sur la perception subjective de l'aspect d'une finition**. Tese de Douturamento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.

COOL, J. **Optimisation de l'usinage de finition du bois d'épinette noire pour fins d'adhésion**. 276 p. Thèse de doctorat en sciences du bois, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec (Québec), 2011.

COOL, J.; HERNÁNDEZ, R. E. Improving the sanding process of black spruce wood for surface quality and water-based coating adhesion. **Forest Products Journal**, v. 61, p. 372-380, 2011a.

COOL, J.; HERNÁNDEZ, R. E. Evaluation of four surfacing methods on black spruce wood in relation to poly (vinyl acetate) gluing performance. **Wood and Fiber Science**, v. 43, n. 2, p. 194-205, 2011b.

COSTA, J. A.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 133-139, 2011.

COUVRAT, P. Le collage moderne. **Hermès**. Paris, France. 63 p. 1990.

CRUMP, Derrick. **The complete guide to wood finishes**. Simon & Schuster, 1992.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ L. **Quality of Machined Wood Surfaces**. Basel, Switzerland: Springer International Publishing. 265p. 2015.

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

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

DE MOURA, L. F.; HERNÁNDEZ, R. E. Effects of abrasive mineral, grit size and feed speed on the quality of sanded surfaces of sugar maple wood. **Wood Science and Technology**, v. 40, p. 517-530, 2006a.

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, p. 130-136, 2006b.

DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R. de. Seleção de espécies/procedências do gênero *Eucalyptus* potenciais para o Semi-Árido do Brasil. In: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO, 2., 2006, La Serena. **Trabajos completos**. Santiago: INFOR; FAO, 2006.

DUPRÉ, A. **Theorie Mecanique de la Chaleur**. Paris, p. 368, 1869.

ECH, M.; YOTTE, S.; MOREL, S.; BREYSSE, D.; POUTEAU, B. Laboratory evaluation of pavement macrotexture durability. **Revue Européenne de Génie Civil**, v. 11, n. 5, p. 643-662, 2007.

EL ABED, S.; IBNSOUDA, K. S.; LATRACHE, H.; BOUTAHARI, S. Theoretical effect of cedar wood surface roughness on the adhesion of conidia from *Penicillium expansum*. **Annals of Microbiology**, v. 62, n. 4, p. 1361-1366, 2012.

ELEOTÉRIO, J. R.; REICHERT, D.; HORNBURG, K. F.; MENEGUELLI, I. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2014.

FAZANO, C. A. T. V. **Tintas: Métodos de controle de pinturas e superfície**. Brasil. Hemus. 287p. 1989.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas e vernizes: ciência e tecnologia**. Edgard Blücher, 1044 p. 2005.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. **IPEF**, v. 4, p. 65-89, 1972.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade básica da madeira do eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3, Manaus, 1978. **Anais**. São Paulo, SBS, v. 2, p. 148-52, 1978.

FERREIRA, A. R.; JOÃO, D. M.; GODOY, L. P. A utilização da matéria-prima eucalipto na indústria moveleira como estratégia para o desenvolvimento sustentável. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, Niterói, 2008. **Anais**. Niterói, 2008.

FRANZ, N.C. **An analysis of the wood-cutting process**. The University of Michigan Press, Ann Arbor (Michigan). 152 p, 1958.

FREITAS, S. V. C.; DOMINGOS, F. C.; MACHADO, V. N. Análise Metrológica de Rugosímetros. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA, 3°, 2014, Gramado. **Anais...** Gramado: 3° CIMMEC, 2014.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, n. 10, p. 17-37, 1975.

FOELKEL, C. E. B. Madeira de eucalipto: da floresta ao digestor. **IPEF**, v. 6, n. 20, p. 1-25, 1978.

FOELKEL, C. E. B.; BUSNARDO, C. A.; DIAS, C.; SCHMIDT, C.; SILVA, R. M. R. da.; VESZ, J. B. V. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Silvicultura**, v. 28, p. 726-731, 1983.

FOELKEL, C. E. B. Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo. **Visão Agrícola**, n. 4, p. 66-69, 2005.

FOLLRICH, J.; VAY, O.; VEIGEL, S.; MÜLLER, U. Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread. **Journal of Wood Science**, v. 56, n. 5, p. 429-434, 2010.

FLOREZ, J. **Comportamento em serviço da madeira jovem de *Tectona grandis* L. f. com diferentes acabamentos para uso em ambiente externo**. 109 f. Tese (Doutorado em Processamento e Utilização da Madeira) – Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

FONTE, A. P. N. **Utilização da madeira de *Cryptomeria japonica* para a produção de painéis colados lateralmente e aplicação de acabamento superficial** 186 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2016.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.

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

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, n. 1, p. 35-40, 2004.

FUJIWARA, Y.; FUJII, Y.; OKUMURA, S. Relationship between roughness parameters based on material ratio curve and tactile roughness for sanded surfaces of two hardwoods. **Journal of Wood Science**, v. 51, n. 3, p. 274-277, 2005.

GALEMBECK, F.; GANDUR, M. C. Cientistas explicam o fenômeno da adesão. **Química e Derivados**, v. 393, p. 24-32, 2001.

GARCIA, R. A.; OLIVEIRA, N. S.; NASCIMENTO, A. M.; DIAS N. S. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014.

GARDNER, D. J.; GENERALLA, N. C.; GUNNELLS, D. W.; WOLCOTT, M. P. Dynamic wettability of wood. **Langmuir**, v. 7, n. 11, p. 2498-2502, 1991.

GARDNER, D. J.; WOLCOTT, M. P.; WILSON, L.; HUANG, Y.; CARPENTER, M. Our understanding of wood surface chemistry in 1995. Proceedings N^o.7296. **Wood Adhesives**. Forest Product Society, Madison, WI. p. 29-36, 1995.

GARNIER, G.; GLASSER, W. G. Measuring the surface energies of spherical cellulose beads by inverse gas chromatography. **Polymer Engineering & Science**, v. 36, n. 6, p. 885-894, 1996.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRADNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, v. 18, p. 102-108, 2004.

GINDL, M.; SINN, G.; REITERER, A.; TSCHEGG, S. Wood surface energy and time dependence of wettability: A comparison of different wood surfaces using an acid-base approach. **Holzforschung**, v. 55, p. 433-440, 2001a.

GINDL, M.; SINN, G.; GINDL, W.; REITERER, A.; TSCHEGG, S. A comparison of diferente methods to calculate the surface free energy of wood using contact angle measurements. Colloids and Surfaces **A-Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 181, p.279-287, 2001b.

GINDL, M.; TSCHEGG, S. Significance of the acidity of wood to the surface free energy components of different wood species. **Langmuir**, v. 18, n. 8, p. 3209-3212, 2002.

GINDL M.; REITERER A.; SINN G.; STANZL-TSCHEGG S. E. Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 62, n. 4, p. 273-280, 2004.

GINDL, W.; SRETENOVIC, A.; VINCENTI, A.; MÜLLER, U. Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part 2: effects of adhesive penetration on strain distribution. **Holzforschung**, v. 59, n. 3, p. 307-310, 2005.

GNECCO, C.; DINIZ, F.; KAIRALLA, R.; FAZENDA, J.; DEUTSCH, P. Curso de Tecnologia em Tintas. **ABRAFATI**, São Paulo, 1989.

GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G.; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F.; VALLE, A. T. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, v. 20, n. 72, p. 47-58, 2001.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru, São Paulo. 242 p. 2000.

GOOD, R. J. Contact angle, wetting, and adhesion: A critical review. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 6, p. 1269-1302, 1992.

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. Processing roughness of sanded wood surfaces. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 63, n. 1, p. 43-52, 2005.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Filtering the roughness of a sanded wood surface. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, n. 5, p. 363-371, 2006.

GUTIÉRREZ, A.; DEL RÍO, J. C.; MARTINEZ, M. J. A. T.; MARTINEZ, A. T.; Lipophilic extractives in process water during manufacturing of totally chlorine free kraft pulp from eucalypt wood. **Trends in Biotechnology**, v. 19, n. 9, p. 340-348, 2001.

HERNÁNDEZ, R. E.; DE MOURA, L. F. Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood. **Wood Fiber and Science**, v. 34, n. 4, p. 540-552, 2002.

HERNÁNDEZ, R. E.; ROJAS, G. Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 2, p. 293-305, 2002.

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

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.

HIKITA, Y.; TOYODA, T.; AZUMA, M. Weathering testing of timber: discoloration. In: IMAMURA, Y. **High performance utilization of wood for outdoor uses**. Kyoto: Press-Net, 2001.

HILLIS, W. E. Historical uses of extractives and exudates. In: ROWELL R. M. (Ed.) **Natural Products of Woody Plants**. Vol. I. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 1-131, 1989.

HIZIROGLU S.; JARUSOMBUTI S.; FUEANGVIVAT V. Surface characteristics of wood composites manufactured in Thailand. **Building and Environment**, v. 39, p. 1359-1364, 2004.

HOADLEY, R. B. **Understanding wood**. A craftsman's guide to Wood Technology. Taunton press, p. 256, 2000.

HOBSON, T. **Exploring Surface Texture: A fundamental guide to the measurement of surface finish**. 7 edição, Leicester: Taylor Hobson Ltda, 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório IBÁ 2017. Brasília: Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017_.pdf. Acesso em: 09 de dezembro de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Relatório Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2017>. Acesso em 09 de dezembro de 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo, 59 p. 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13565-2**: Geometrical Product Specifications (GPS). Surface Texture. Profile Method; Surfaces having stratified functional properties. Part 2: Height characterisation using the linear material ratio curve. London. 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16610-31**: Geometrical product specifications (GPS) – Filtration part 31: robust profile filters. Gaussian regression filters, London. 2002.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 25178**: Geometrical product specification (GPS) – surface texture: areal – part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. 2012.

ISKRA, P. HERNÁNDEZ, R. E. Analysis of cutting forces in straight-knife peripheral cutting of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 44, n. 2, p. 134-144, 2012.

JAKUB, S; MARTINO, N. **Wood surface roughness–what is it?** Proc IWMS, v. 17, p. 242-250, 2005.

JANKOWSKA, A., ZBIEC, M., KOZAKIEWICZ, P., KOCZAN, G., OLENSKA, S., & BEER, P. The wettability and surface free energy of sawn, sliced and sanded european oak wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 3, p. 443-454, 2018.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (JIS). **JIS B0601: Geometrical Products Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.** Tokyo, 2001.

JODIN, P. **Le bois matériau d'ingénierie.** Association pour la recherche sur le bois en Lorraine. École nationale du génie rural, des eaux et des forêts. Arbolor Nancy (Nancy). 433 p, 1994.

KEYENCE. Introduction à la mesure de rugosité, 2019. Disponível em: <https://www.keyence.eu/fr/fr/ss/products/microscope/roughness/index.jsp> Acessado em 11 de dez. 2018.

KHAZAEIAN, A. **Caractérisation 3D de l'état de surface du bois: stratégie de mesure - influence des paramètres liés à l'essence et à l'usinage.** 241 f. Thèse (Doctorat en Sciences forestières et sciences du bois), École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Université Paul Sabatier, Toulouse. 2006.

KILLIC, M.; SALIM, H.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, v. 41, p. 1074-1078, 2006.

KOCH, P. **Utilization of hardwoods growing on southern pine sites.** Volume 2: Processing. Agriculture Handbook n° 605, USDA, Forest Service, Washington (DC). 1985.

KONICA MINOLTA SENSING INC. **Comunicação precisa da cor: Controle de qualidade da percepção à instrumentação.** 59 p. 1998.

KRÁNITZ, K.; SONDEREGGER, W.; BUES, C. T.; NIEMZ, P. Effects of aging on wood: a literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 7-22, 2016.

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

KÚDELA, J.; KURJATKO, S. **Wood Structure and Properties'02.** Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, 221p. 2002.

LATTHE, S. S.; TERASHIMA, C.; NAKATA, K.; FUJISHIMA, A. Superhydrophobic surfaces developed by mimicking hierarchical surface morphology of lotus leaf. **Molecules**, v. 19, n. 4, p. 4256-4283, 2014.

LIHRA T, GANEV S. **Machining properties of eastern species and composite panels.** Forintek Canada Corp, Division de l'Est. Ste-Foy, Québec, Canada. 62p, 1999.

LIPTÁKOVÁ, E.; KÚDELA, J.; BASTL, Z.; SPIROVOVÁ, L. Influence of mechanical surfasse treatment of wood on the wetting process. **Holzforschung**, v. 49, p. 369-375, 1995.

LIU, F. P.; RIALS, T. G.; SIMONSEN, J. Relationship of wood surface energy to surface composition. **Langmuir**, v. 14, n. 2, p. 536-541. 1998.

LOSADA, B. **Manual de pintura sayerlack.** 110 p. 2011.

LUCAS FILHO, F. C. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. 176 f. Tese (Doutorado em Gestão do Design e do Produto) - Setor de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Review article: use of the wettability in the investigation of the corrosion behaviour of the refractory materials. **Cerâmica**, v. 54, n. 330, p. 174-183, 2008.

MALDAS, D. C.; KAMDEM, D. P. Wettability of Extracted Southern Pine. **Forest Products Journal**, v. 49, n. 11/12, p. 91-93, 1999.

MARRA, A. A. **Technology of Wood bonding: principles and practice**. Nova York, Van N. Reinhold, 454p. 1992.

MARTINS, J. G. **Materiais de Construção – Tintas, Vernizes e Ceras** 2ª edição, 2005.

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*. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 135-143, 2011a.

MARTINS, S. A.; DOS SANTOS, C. M. T.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Envelhecimento artificial acelerado por radiação ultravioleta de madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, v. 41, n. 1, p.87-96, 2011b.

MANTANIS, G. I.; YOUNG, R. A. Wetting of wood. **Wood science and Technology**, v. 31, n. 5, p. 339, 1997.

MATSUO M.; YOKOYAMA M.; UMEMURA K.; SUGIYAMA J.; KAWAI S.; GRIL J.; KUBODERA S.; MITSUTANI T.; OZAKI H.; SAKAMOTO M.; IMAMURA M. Aging of wood: analysis of color changes during natural aging and heat treatment. **Holzforschung**, v. 65, p. 361-368, 2011.

MAXIMO, D.; ELIAS, C. N.; FERNANDES D. J.; MONTEIRO, F. O.; CAVALCANTI, J. Análise da superfície e osseointegração de implantes dentários com superfícies biomiméticas contendo Ca, Mg e F. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 196-203. 2016.

MCKENZIE, W. M. Fundamental aspects of the Wood cutting process. **Forest Products Journal**, v. 12, n. 6, p. 19-26, 1960.

MEDEIROS NETO, P. N. **Resistência natural da madeira de sete espécies de *Eucalyptus* a agentes xilófagos**. 2017. 123 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro ES, 2017.

MICHIGAN METROLOGY SURFACE TEXTURE PARAMETERS GLOSSARY. 2014. Disponível em: https://www.michmet.com/Texture_parameters.htm. Acessado em 29 de novembro de 2018.

MIKLECIC J.; JIROUS-RAJKOVIC V.; ANTONOVIC A.; SPANIC N. Discoloration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposure. **Bioresources**, v. 6, p. 434-446, 2011.

MIKLECIC J.; KASA A.; JIROUS-RAJKOVIC V. Colour changes of modified oak wood in indoor environment. **European Journal Wood and Wood Products**, v. 70, p. 385-387, 2012.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. Sociedade Brasileira de Silvicultura, São Paulo, SP. 2000.

MOYA, R.; BERROCAL, A. Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. **Annals of Forest Science**, v. 67, n. 1, p. 109, 2010.

MYERS, D. **Surface Interface and Colloids: Principles and Applications**. New York: Editora: John Wiley & Sons, 1999.

MUÑIZ, G. I. B. Fatores que limitam a utilização da madeira de *Eucalyptus*. In: SEMINÁRIO SÓLIDOS DE EUCALIPTO: AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS, 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2002. p. 30-63.

NCUBE, E.; MEINCKEN, M. Surface characteristics of coated soft and hardwoods due to UV-B ageing. **Applied Surface Science**, v. 256, p. 7504-7509, 2010.

NERI, A. C.; GONÇALVES, R.; HERNANDEZ, R. E. Forças de corte ortogonal 90-0 em três espécies de madeira de eucalipto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 239-244, 1999.

NUSSBAUM, R. M. The time limit to avoid natural inactivation of spruce surfaces intended for painting or gluing. **Holz als Rohund Werkstoff**, v. 54, n.1, p. 26-26, 1996.

NUSSBAUM, R. M. Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 57, n. 6, p. 419-424, 1999.

NUSSBAUM, R. M.; STERLEY, M. The effect of wood extractive content on glue adhesion and surface wettability of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 1, p. 57-71, 2002.

NYLUND, J.; SUNDBERG, K.; SHEN, Q.; ROSENOLM, J. B. Determination of surface energy and wettability of wood resins. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 133, n. 3, p. 261-268, 1998.

OLIVEIRA, D. M. **Especificações de acabamentos pintados ou envernizados para elementos construtivos exteriores em madeira** 2008, 94 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.

OLIVEIRA, C. J. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados à topografia de superfícies em usinagens.** 2004. 135 f. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

OLIVEIRA, J. T. S.; FILHO, M. T.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PALERMO, G. P. de M. **Propriedades e comportamento tecnológico da madeira de *Eucalyptus grandis* W . Hill ex- Maiden visando a sua utilização em produtos de maior valor agregado.** 249 f. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; MOURA, L. F.; NOLASCO, A. M.; CARVALHO, A. M.; GARCIA, R. A. Surface roughness of heat treated *Eucalyptus grandis* wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 16, n. 1, p. 3-12, 2014.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M.; GARCIA, R. A. Avaliação da superfície da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden tratada termicamente. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 145-152, 2015.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y.; **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PEREIRA, K. R. M. **Análise físico-química e molhabilidade da superfície de madeiras amazônicas.** 2017. 103 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017.

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, n. 4, p. 490-510, 2010.

PIZZI, A.; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology.** New York: Marcell Deckker, 680 p., 1994.

QIN, Z.; CHEN, H.; GAO, Q.; ZHANG, S.; LI, J. Wettability of sanded and aged fast-growing poplar wood surfaces: I. surface free energy. **BioResources**, v. 10, n.1, p. 1008-1023, 2015.

RIBEIRO, F. de A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, n. 46, p. 76-85, 1993.

ROWELL R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Estados Unidos: Editora CRC Press, 2005.

SADOH, T.; NAKATO, K. Surface properties of wood in physical and sensory aspects. **Wood Science and Technology**, v. 21, p. 111–120, 1987.

SANDAK, J.; TANAKA, C. Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor 1: effect of wood species. **Journal of Wood Science**, v. 49, n. 4, p. 305-311, 2003.

SANTONI, I.; PIZZO, B. Effect of surface conditions related to machining and air exposure on wettability of different Mediterranean wood species. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 7, p. 743-753, 2011.

SCHEIKL, M.; DUNKY, M. Measurement of dynamic and static contact angles on wood for the determination of its surface tension and the penetration of liquids into the wood surface. **Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, v. 52, n. 1, p. 89-94, 1998.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker. p.19-32. 1994.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. **Theories and Mechanisms of Adhesion**. In: PIZZI A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesive Technology - Second Edition, Revised and Expanded**. p. 61-75, 2003.

SECCO, A. R.; VIEIRA, E.; GORDO, N. Aula 19: Parametros da rugosidade. Telecurso 2000. Curso Profissionalizante. Metrologia. Disponível em: http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/didaticos_e_tematicos/telecurso_2000_cursos_profissionais/telecurso_2000_metrologia. 2007. Acessado em 28 de abril de 2015.

SERNEK, M.; KAMKE, F.A.; MOTNIK SERNEK, I. Influence of temperature and time on the curing of wood adhesives. **Forest Product Society**, p. 106-107, 2000.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). Acabador de móveis. Ubá, 1995. 29 p.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes idades, visando sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J. P. A. G. **Especificações de tratamentos de preservação para elementos de madeira**. 2008. 83 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

SILVA, J. R. M.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Preparação de superfícies de madeira e derivados para receber acabamento. **Boletim Agropecuário**, v. 28, p. 5-26, 1999. (Boletim Técnico).

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden**. 179 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CAIXETA, J.; DELLA LUCIA, R. M. Produtos utilizados no setor de acabamento de móveis de madeira—características e técnicas de aplicação. **Lavras/MG: Editora UFLA**. 2002.

SILVA, J. R. M.; MUÑIZ, G. I. B.; LIMA, J. T.; BONDUELLE, A. F. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 479-487, 2005.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; BRAGA, P. P. C.; TRUGILHO, P. F. A utilização de rugosímetro na qualificação das superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus sp.* In: ENCONTRO NACIONAL EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Carlos: EBRAMEM, 2006.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* em diferentes regiões da medula à casca. **Cerne**, v. 13, n. 1, p. 25-31, 2007.

SILVA J. R. M, BRAGA PPC, MARTINS M, FILIPE AP. Identificação de parâmetros de rugosidade para qualificação de pisos de *Eucalyptus grandis*. In: **Anais Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira**; 11.; 2008; Londrina. Londrina: Universidade Estadual de Londrina; 2008.

SILVA, J. R. M.; MARTINS, M.; OLIVEIRA, G. M. V.; BRAGA, P. P. C. Parâmetros de qualidade da usinagem para a determinação dos diferentes usos da madeira de *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 15, n. 1, p. 75-83, 2009.

SINN, G.; GINDL, M.; REITERER, A.; STANZL-TSCHEGG, S. Changes in the surface properties of wood due to sanding. **Holzforschung**, v. 58, n. 3, p. 246-251, 2004.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Fatos e números do Brasil florestal, 2006. Disponível em: <http://www.sbs.org.br>. Acesso em: 20 de maio 2015.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry, fundamentals and applications**. New York, Editora: Academic Press, 293 p. 1993.

SONDEREGGER, W.; KRÁNITZ, K.; BUES, C. T.; NIEMZ, P. Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood. **Journal of Cultural Heritage**, v. 16, n. 6, p. 883-889, 2015.

SOUSA, F. R. R. **Estudo do Envernizamento de Madeiras Exóticas com Vernizes Aquosos**. 146f. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química. Universidade do Porto, Porto, 2008.

SOUZA, A. P.; DELLA LUCIA, R. M.; RESENDE, G. C. Estudo da densidade básica da madeira de *Eucalyptus microcorys* F. Muell, cultivado na região de Dionísio, MG. **Revista Árvore**, v. 3, n. 1, p. 16-27, 1979.

SOUZA, M. O. A.; SILVA, J. C.; LUCIA, R. M. D.; EVANGELISTA, W. V. Avaliação da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* em ensaios de usinagem, visando à produção moveleira. **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 751-758, 2009.

STANGERLIN, D. M. **Monitoramento de propriedades de madeiras da Amazônia submetidas ao ataque de fungos apodrecedores**. 2012. 259 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

STANGERLIN, D. M.; DA COSTA, A. F.; PASTORE, T., DEL MENEZZI, C. H.; DE 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, 2013.

STEHR, M.; GARDNER, D. J.; WÄLINDER, M. E. P. Dynamic wettability of different machined wood surfaces. **Journal of Adhesion**, v. 76, p. 185-200, 2001.

STEWART, H. A. Analysis of orthogonal woodcutting across the grain. **Wood Science**, v. 12, n. 1, p. 38-45, 1979.

STEWART, H. A. Some surfacing defects and problems related to wood moisture content. **Wood and Fiber Science**, v. 12, n. 3, p. 175-182, 1980.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n.14, p. 28-38,1987.

TAN, P. L.; SHARIF, S.; SUDIN, I. Roughness models for sanded wood surfaces. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 129-142, 2012.

TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. **Forest Products Journal**, v. 49, n. 5, p. 41-46, 1999.

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

TRUGILHO, P. F; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-química e anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA; LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS. Mercado aponta uso do eucalipto para móveis. Revista da Madeira, n.103, 2007. Disponível em:http://remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1053&subject=Eucalipto&title=Mercado%20aponta%20uso%20do%20eucalipto%20para%20m%F3veis Acesso em: 11 jun. 2015.

UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R. E. Effects of four surfacing methods on surface properties and coating performance of red oak wood. **Proceedings** of the XXII International Wood Machining Seminar June 14-17, 2015. Quebec City, Canada.

UGULINO, B. **Effets des procédés d'usinage de finition sur les propriétés de surface, la performance d'un vernis et l'émission de poussières du bois chêne rouge**. Thèse de doctorat en sciences du bois, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec (Québec), 2016.

UGULINO, B; HERNÁNDEZ, R. E. Analysis of sanding parameters on surface properties and coating performance of red oak wood. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-9, 2016a.

UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R. E. Assessment of surface properties and solvent-borne coating performance of red oak wood produced by peripheral planing. **European Journal of Wood and Wood Products**, p. 1-13, 2016b.

VARANDA L. D.; ALVES M. C. S.; GONÇALVES M. T. T.; SANTIAGO L. F. F. A influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 16, p. 23-32, 2010.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Chap. 9, p. 1-24. 1999.

VAN OSS, C. J.; GOOD, R. J.; AND CHAUDHURY, M. K. Additive and nonadditive surface tension components and the interpretation of contact angles. **Langmuir**, v. 4, n. 4, p. 884-891, 1988.

VOLPE, C. D.; SIBONI, S. Some reflections on acid–base solid surface free energy theories. **Journal Colloid Interface Science**, v. 195, n. 1, p. 121-136, 1997.

ZENID, G. J. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, v. 2, n. 1, p. 1-103, 2009.

YOUNG, T. An essay of the cohesion of fluids. **Philosophical Transaction of the Royal Society of Lond**, v. 95, p. 65-87, 1805.

WÅLINDER, M. **Wetting phenomena on wood: factors influencing measurements of wood wettability**. 2000. 70f. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira), KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.

WÅLINDER, M. E. P.; STROM, G. Measurement of wood wettability by the Wilhelmy method - Part 2. Determination of apparent contact angles. **Holzforschung**, v. 55, n. 1, p. 33-41, 2001.

WÅLINDER, M. E. P. Study of Lewis acid-base properties of wood by contact angle analysis. **Holzforschung**, v. 56, n. 4, p. 363-371, 2002.

WATAI, L. T. **Tecnologia básica em acabamentos de madeiras**, 102 p. São Paulo: IPT, 1995.

WEISSENSTEIN, C. Usinagem, condições da ferramenta decide bom acabamento. **Revista da Madeira**, Curitiba, n.57, p.30- 32, 2000.

WENGERT, G. The wood doctor's RX. **Virginia Polytechnic Institute and State University**, Blacksburg, 1988.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface metrology**. Leicester: CRC Press, 1994.

WILLIAMS D, MORRIS R **Machining and related mechanical properties of 15 B.C. wood species**. Forintek Canada Corp, Division de l'Ouest. Vancouver, B.C., Canadá. 31p, 1998.

WILLIAMS, R. S.; FEIST, W. C.; KNAEBE, M. **Finishes for Exterior Wood: Selection, Application, and Maintenance: A comprehensive guide to the painting/staining and maintenance of homes, decks, log structures, and more.** US Department, of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1996.

WOODSON, G. E.; KOCH, P. **Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine.** Res. Pap. SO-52. New Orleans, LA: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, v. 52, 29 p., 1970.

WU, S. Calculation of interfacial tension in polymer systems. **Journal of Polymer Science**, v. 34, p. 19-30, 1971.

WULF, M./ NETUSCHIL, P.; HORA, G.; SCHMICH, P.; CAMMENGA, H. K. Investigation of the wetting characteristics of medium density fibreboards (MDF) by means of contact angle measurements. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 55, p 331-335, 1997.