

ULISSES FRAZÃO DE OLIVEIRA TIBURCIO

MEDIÇÃO E ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DA
MADEIRA DE EUCALIPTO NA USINAGEM DE TORNEAMENTO
CILÍNDRICO E LIXAMENTO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica na área
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Guaratinguetá
2009

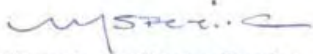
T554m	Tiburcio, Ulisses Frazão de Oliveira Medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento. / Ulisses Frazão de Oliveira Tiburcio – Guaratinguetá : [s.n], 2009. 101f. : il. Bibliografia: f. 82-88 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tiburcio Gonçalves 1. Usinagem 2. Acabamentos em madeira I. Título CDU 621.9
-------	---

ULISSES FRAZÃO DE OLIVEIRA TIBÚRCIO

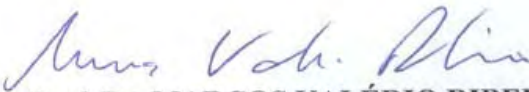
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

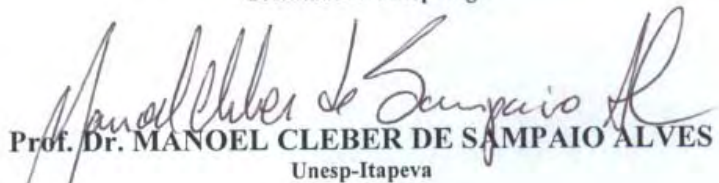
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

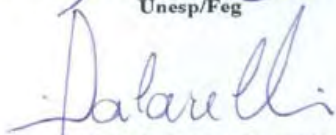

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

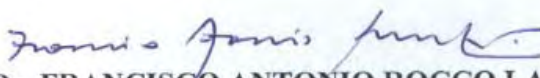
BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Unesp-Itapeva


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
Unesp/Feg


Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI
Unesp/Feb


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR
USP/São Carlos

novembro de 2009

DADOS CURRICULARES

ULISSES FRAZÃO DE OLIVEIRA TIBURCIO

NASCIMENTO	08.09.1957 – BARIRI / SP
FILIAÇÃO	Álvaro Tiburcio de Souza Marina Eunice de Oliveira Tiburcio
1987/1991	Curso de Graduação Tecnologia de Processamento de Dados - Universidade Estadual Paulista – Campus de Bauru
1997/2000	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru da Universidade Estadual Paulista.

aos meus filhos, de modo especial minha filha Camila, que com os seus meses de vida, foi a grande incentivadora para que eu continuasse no curso, e à minha esposa Ana Lúcia.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, e sua infinita bondade. Agradeço pela minha vida, minha saúde, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* e ao meu co-orientador *Prof. Dr. Marcos Tadeu Tiburcio Gonçalves* que jamais deixaram de me incentivar. Sem esta orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Álvaro* e *Marina*, por sua dedicação na minha educação e formação como cidadão.

aos servidores da secretaria da pós-graduação, *Regina*, *Cristina* e *Sidney*, pela dedicação e alegria no atendimento.

aos servidores técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG, pela colaboração e amizade.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Bauru pela presteza e dedicação.

aos Engenheiros *Artur Alves Fiocci* e *Gill Bukvic*, pelo companheirismo, colaboração e troca de informações.

ao *Prof Dr. Manoel Henrique Salgado*, pela orientação na análise estatística, contribuindo muito com a qualidade deste trabalho.

aos colegas servidores professores e técnico-administrativos do Departamento de Engenharia Mecânica da FEB, pelo apoio irrestrito nesta caminhada.

Não deixe que a saudade sufoque, que a rotina
acomode, que o medo impeça de tentar.
Desconfie do destino e acredite em você.
Gaste mais horas realizando que sonhando,
fazendo que planejando, vivendo que esperando,
porque embora quem quase morre esteja vivo,
quem quase vive já morreu.

Luis Fernando Veríssimo

TIBURCIO, U. F. O. **Medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento**. 2009. 101f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

O processo de lixamento da madeira é uma prática comum para preparar sua superfície para o revestimento. A qualidade superficial da madeira é diretamente relacionada ao revestimento, aderência, custos de pós processamento e aparência estética do produto. Vários parâmetros influenciam no acabamento superficial da madeira como: espécie de madeira, processo de usinagem e granulometria da lixa. Nesta tese foram coletados dados de rugosidade superficial de amostras das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora* usinadas em torno tubular em três velocidades de avanço (10, 14 e 18m/min.) e lixadas em lixadeira de cinta vertical dupla por quatro jogos de lixas abrasivas de alumínio zirconado. Estes jogos foram compostos com lixas de granulometrias 80, 100 e 120 (80-100, 80-120, 100-120 e U80-120), sendo a primeira lixa para desbaste e a segunda para acabamento. Concluiu-se que para os três conjuntos de lixas novas empregadas, o conjunto de lixas de granulometrias 80 e 120, para desbaste e acabamento, respectivamente, foi aquele que apresentou o melhor desempenho quanto ao acabamento superficial para as duas espécies. O emprego de lixas usadas não demonstrou perda significativa de rendimento se comparadas às demais combinações de lixas novas. O conjunto de lixas 80-120 apresenta, numa razão proporcional, uma variação de 4% no valor de “Ra” para cada 4 m/min aumentado na velocidade de avanço do torneamento das amostras. Pode-se afirmar que, em condições ótimas de lixamento, em média, a cada 0,1mm/rot de aumento no avanço por dente no torneamento, tem-se o aumento de 1% em “Ra”.

PALAVRAS-CHAVE: Superfície da madeira. Lixamento da madeira. Rugosidade.

TIBURCIO, U. F. O. **Measurement and analysis of the surface finish of eucalyptus wood machining in cylindrical turning and sanding.** 2009. 101f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

The process of sanding the wood is a common practice to prepare the surface for coating. The surface quality of wood is directly related to the coating, adhesion, costs of post-processing and aesthetic appearance of the product. Several parameters influence the surface finish of the wood as wood species, machining process and particle size of sandpaper. In this thesis the analysis was based on data collected in surface roughness of samples of species *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus citriodora* machined in tubiform lathe three feed rate (10, 14 and 18m/min.) and sanded in double vertical belt sander by and four sets of abrasive zirconia aluminium. These sets were composed with grain sizes 80,100 and 120 mesh (80-100, 80-120, 100-120 e U80-120), the first sandpaper for roughing and second for finishing. It was concluded that for the three new sets of sandpaper used, the combination of grit sizes of 80 and 120, for roughing and finishing, respectively, presented the best performance on the surface finishing for both species. The use of worn sandpaper showed no significant loss of income compared to the other combinations of new sandpaper. The set of sandpaper 80-120 provides, in proportion to a variation of 4% in the value of "Ra" for each 4 m/min increased the feed rate speed of the turning of the samples. Thus, can be conclude that, under optimal conditions of sanding, on average, every 0.1 mm/rev increased in feed per tooth, increases of 1% in "Ra".

KEYWORDS: Wood surface. Wood sanding. Roughness.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Relevância e justificativa.....	12
1.2 Objetivo.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Métodos de medição para análise de superfícies de madeira.....	15
2.2. Estudos sobre o processo de lixamento de madeiras.....	17
2.3 Estudos sobre acabamento superficial de madeiras.....	20
2.4 Características e propriedades das madeiras de <i>Eucalyptus citriodora</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	28
2.5 Conclusões sobre a revisão bibliográfica.....	29
3 ASPECTOS TEÓRICOS E TECNOLÓGICOS.....	31
3.1 Sistema de corte da madeira.....	31
3.2 Lixamento.....	33
3.2.1 Composição das Lixas.....	34
3.2.2 O processo de fabricação das lixas.....	39
3.3 Rugosidade superficial.....	41
3.3.1 Critérios para avaliar a rugosidade.....	42
3.3.2 Parâmetros de rugosidade superficial.....	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.1 Preparação das amostras de madeira.....	49
4.2 Ensaio de lixamento.....	56
4.2.1 Máquina de ensaio.....	56
4.2.2 Operação de lixamento.....	57
4.3 Medição do acabamento superficial.....	60
4.3.1 Instrumento de medição (Rugosímetro).....	60
4.3.2 Procedimentos de medição da rugosidade.....	60
4.3.3 Apresentação dos resultados.....	61
4.3.4 Análise estatística dos resultados.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1 Ensaio da espécie <i>Eucalyptus grandis</i>	63
5.2 Ensaio da espécie <i>Eucalyptus citriodora</i>	67
5.3 Comparação dos resultados entre as espécies de eucalipto.....	71
5.4 Análise estatística dos resultados.....	74
6 CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
APÊNDICE A.....	89
ANEXO A.....	95

1 INTRODUÇÃO

O processo de lixamento da madeira, tem ampla aplicação na indústria madeireira o qual tem a função de preparar a superfície usinada para receber aplicação de revestimentos com a finalidade de oferecer acabamentos dos mais variados tipos para diversas utilizações comerciais de produtos à base de madeira.

A aplicação de um revestimento tem a função decorativa e protetora sobre a superfície da madeira e é o último processo de fabricação de um produto. A qualidade do acabamento pode ser medida pela quantificação de parâmetros utilizados em todo o processo produtivo. Desta forma, as operações que antecedem o acabamento final desta superfície têm importante influência sobre o mesmo.

Dentre a grande diversidade de aplicações de peças de madeira, as de perfil cilíndrico têm grande aplicação comercial podendo ser empregadas como cabos de ferramentas, peças para mobiliário dentre outras utilizações.

A superfície da madeira é uma mistura heterogênea e complexa de polímeros lignocelulósicos, sendo influenciada por diversos fatores intrínsecos do material, como, a morfologia, a densidade, a textura, a rugosidade, a umidade e também pelas condições de usinagem (CÔTÉ et al, 1983, apud COELHO et al, 2005). A rugosidade da superfície depende fundamentalmente da estrutura da madeira e do processamento, tornando-se um item importante na seleção, aplicação e durabilidade dos acabamentos (WILLIAMS et al, 1996, apud COELHO et al, 2005). A preparação das superfícies de madeira para a aplicação dos produtos de acabamento processa-se após a conclusão das operações de definição geométrica das superfícies, por operações de corte convencionais e posterior remoção das irregularidades pelo processo de lixamento.

O desempenho das ferramentas de corte nos processos de usinagem de madeiras pode ser indicado pelo consumo de energia necessário ao corte para operações de desbaste ou pela qualidade superficial obtida em operações de acabamento. Para ambas as situações, refere-se o termo “usinabilidade” (GONÇALVES, 2000).

Koch (1964) descreve sobre a tecnologia da usinagem da madeira, envolvendo dentre outras, operações de fresamento, torneamento e lixamento. Basicamente, as operações de usinagem da madeira seguem dois tipos singulares: o primeiro é o

fresamento cilíndrico tangencial, que é realizado por um cabeçote rotativo constituído de facas distribuídas em sua periferia; o segundo é o corte ortogonal, no qual a aresta da ferramenta de corte atua perpendicularmente à direção do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Esta operação pode ser considerada um caso particular do tipo anteriormente citado, considerando infinito o raio do cabeçote rotativo, e nula a velocidade angular da ferramenta.

O estudo da usinabilidade serve para descobrir as propriedades de mecanização de um determinado material, definindo-a ainda como a facilidade de se manipular um material em formas e dimensões definidas com certa qualidade superficial, por operações de corte. Dependendo do tipo de superfície e do material avaliado, a definição da qualidade superficial pode ter um significado diferente, conforme o comprimento de amostragem (MALDONADO, 1998). A Figura 1.1 apresenta a interação entre os fatores envolvidos num processo de usinagem.

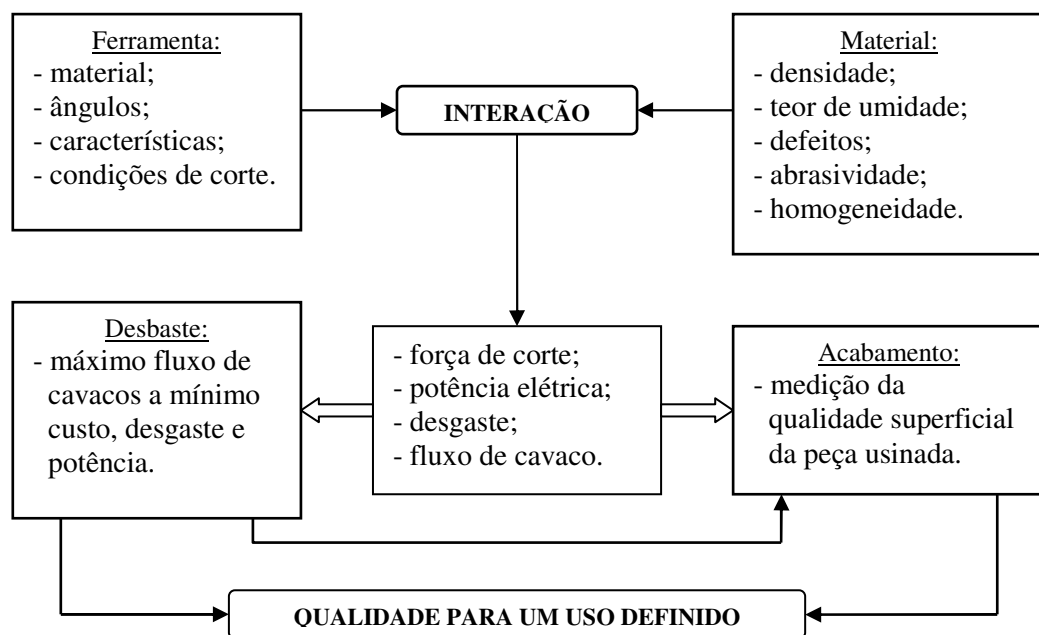


Figura 1.1 – Descrição geral dos fatores envolvidos no processo de usinagem (TRIBOULOT et al.,1991).

Todo material possui uma superfície caracterizada por uma determinada textura e rugosidade superficial que são dependentes do processo de fabricação envolvido, da natureza do próprio material ou uma combinação dos dois. De acordo com a aplicação do produto final, a qualidade superficial torna-se uma característica de controle extremamente importante. A qualidade superficial é utilizada como uma ferramenta

para o estudo da usinabilidade dos materiais. Nos ensaios, os parâmetros de usinagem podem ser variados, e as melhores qualidades superficiais obtidas determinam quais são as características ideais para esse processamento (LEMASTER; BEALL, 1996).

Segundo Hiziroglu (1996) vários trabalhos têm sido desenvolvidos para a avaliação da rugosidade superficial de madeiras e materiais compostos de madeira. Entretanto, atualmente não existem diretrizes práticas definitivas estabelecidas ou procedimentos de análise e de quantificação. Assim, a avaliação destes resultados deve ser realizada segundo um estudo estatístico detalhado, para que as comparações entre superfícies obtidas em operações de parâmetros distintos possam ser realizadas com maior precisão. Para a obtenção desses valores de rugosidade são utilizados vários tipos de sistemas de medição, no qual o autor classifica a técnica de apalpamento como de alta resolução, porém com as seguintes desvantagens: baixa velocidade, método de contato, análise bidimensional, possibilidade de usinar a superfície e insensibilidade às fibras individuais e expostas. Apesar da experiência de técnicas mais sofisticadas, Hiziroglu conclui que este método pode ser efetivamente utilizado para quantificar a qualidade superficial de madeiras e materiais compostos de madeira.

A técnica de medição da rugosidade superficial da madeira pelo método de apalpamento mecânico foi amplamente utilizada por diferentes pesquisadores nas décadas de 1980 e 1990 (CASTRO, 2000).

1.1 Relevância e justificativa

Conforme se pode notar na extensa literatura sobre processos de usinagem de madeira, com relação aos sistemas de corte classificados por McKenzie (1960) quais sejam: corte paralelo às fibras (notação 90-0) e corte perpendicular às fibras (notações 0-90 e 90-90), a grande maioria dos estudos refere-se ao corte paralelo às fibras (90-0) para o corte definido por Koch (1964) como “ortogonal”. Quanto ao desempenho de corte para as operações do tipo “fresamento periférico” nas direções perpendiculares às fibras (0-90) e (90-90), onde se enquadram diversas operações usuais de fresamento e torneamento de madeiras, encontram-se poucas pesquisas sobre esta condição de usinagem.

A produção de peças de madeira de formato cilíndrico e de perfis é um caso típico do fresamento periférico na direção perpendicular às fibras, bem definidas e de fácil estudo em equipamentos de torneamento de madeiras, cujas peças depois de usinadas poderão ou não ser submetidas ao processo de lixamento.

Da forma exposta, considera-se de grande relevância o desenvolvimento do presente estudo, dado a falta de desenvolvimento de ferramentas e dispositivos porta-ferramentas (cabeçotes), pelo setor de máquinas e equipamentos para processar madeira, a fim de proporcionar melhorias no desempenho das citadas operações de corte.

As amostras de madeira utilizadas no presente estudo foram confeccionadas a partir de duas espécies dicotiledôneas de reflorestamento, de grande aplicação industrial, quais sejam: *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*. A escolha dessas espécies de madeira de eucalipto se deve a disponibilidade deste material, principalmente na região sudeste do Brasil, bem como da necessidade de qualificar estas espécies para aplicações de maior valor na produção de bens duráveis, em que os fatores de comportamento físico das peças pós-processadas não interfiram em sua indicação para uso.

A partir dos resultados obtidos no estudo proposto, pretende-se contribuir com o setor madeireiro do país, por meio da difusão de conhecimentos científicos e tecnológicos que visam aprimorar as técnicas de produção das empresas que processam madeira, de forma a favorecer o desenvolvimento de seus sistemas produtivos, tendo em vista o aumento da produtividade com melhoria da qualidade e redução dos custos, aliado as questões de melhor aproveitamento da madeira, estimulando a produção de bens duráveis de maior valor agregado à matéria-prima, de forma a incrementar esta atividade econômica com racionalização, gerando novas oportunidades de trabalho e renda.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados obtidos das medições de rugosidade do acabamento superficial de peças de madeira das espécies *Eucalyptus*

grandis e *Eucalyptus citriodora*, submetidos ao corte perpendicular às fibras em operação de torneamento cilíndrico e posterior lixamento com a finalidade de verificar: o conjunto de lixas que apresenta melhor acabamento superficial; a influência da velocidade avanço de torneamento na operação de lixamento, além de comparar o desempenho dos conjuntos de lixas ensaiados e os parâmetros estudados para as duas espécies de madeira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de medição para análise de superfícies de madeira

Em 1991, Zavarin, Cool e Jones, analisaram a superfície da madeira “*White fir*” determinando o índice de refração luminosa de sua superfície, empregando o método de espectroscopia no infravermelho. A profundidade de penetração da luz na madeira foi calculada em 0,13 a 2,15 μm , dependendo do comprimento de onda da luz, do ângulo de incidência e do índice de refração do prisma usado. Estes autores verificaram que a relação sinal/ruído poderia ser aumentada submetendo a madeira a esforços por compressão ou lixando sua superfície com lixa fina.

Empregando-se 4 diferentes granulometrias de lixas em superfícies de peças das espécies de “*Spruce*” e “*Beech*”, Sinn et al. (2004) verificaram a variação das propriedades da superfície da madeira em função do processo de lixamento. A morfologia e variações químicas das superfícies das amostras foram determinadas pela medição da rugosidade e determinação da energia livre de acordo com a teoria “ácido-base” e espectroscopia fotoeletrônica de raio X. Um modelo de análise foi proposto para descrever as alterações químicas devido ao lixamento e os dados foram analisados de acordo com ele. Pode ser demonstrado que “*Spruce*” e “*Beech*” comportam-se de forma semelhante e que as alterações químicas são funções não-lineares da granulometria, bem como da rugosidade superficial.

Um sistema de captação de imagens a laser foi desenvolvido por Hu e Afzal (2005), com o objetivo de determinar a rugosidade superficial da madeira de forma automática e sem contato, utilizando-se uma função bidimensional pelo modelo Gaussiano. Os resultados mostraram que o sistema de processamento de imagem é eficaz e adequado para a determinação da rugosidade superficial da madeira da espécie *Japanese beech*. O estudo apresentou uma correlação linear entre a função Gaussiana e a rugosidade superficial da madeira. No entanto, é recomendado um estudo mais aprofundado sobre as influências das propriedades da madeira, tais como, a estrutura anatômica, densidade, cor e a precisão na medição.

Silva et al. (2006a) avaliaram a técnica de captura de imagens de superfícies usinadas de madeiras de Eucalipto por meio de iluminação com laser de baixa potência aplicada em diferentes ângulos (metrologia óptica – Laser Ne-He). As imagens foram processadas tomando como base os padrões de “Speckle” formados na superfície do material, usando as sombras formadas pela iluminação da madeira. Os resultados de distintos ângulos foram comparados e, uma análise espectral foi conduzida para caracterizar as frequências em cada perfil. Os resultados mostraram que a iluminação aproximadamente paralela entre a madeira e o laser foi a que apresentou imagens mais bem definidas, possibilitando a visualização dos picos gerados pelos avanços por dente (fz). A potencialidade da técnica ficou comprovada como viável, necessitando seu aprimoramento, bem como tratamento das imagens para sua mensuração. No mesmo ano (2006b), os autores Silva et al, realizaram novos experimentos, com o objetivo de medir a textura da superfície usinada da madeira de Eucalipto empregando um rugosímetro Surtronic 3+ e de determinar o avanço por dente calculado e medido por inspeção direta da superfície, correlacionando os parâmetros de rugosidade com os valores de avanço por dente “fz”. Os ensaios de usinagem foram desenvolvidos em uma tupia moldureira com velocidades de avanço de 3, 6, 15 e 30 m/min, diâmetros das fresas de 80, 100 e 125 mm e diferentes ângulos de afiação. Os resultados de avanço por dente mostraram que com menor velocidade de avanço e maior rotação apresentaram melhores resultados quanto a qualidade da superfície, independentemente dos ângulos da ferramenta. Dependendo do ângulo do dente da ferramenta usado, foi observada variação da rugosidade para parâmetros de usinagem semelhantes.

Em 2008, Coelho et al. estabeleceram um método para avaliar a influência dos parâmetros de operação de usinagem de madeira em operações de aplainamento e de lixamento sobre a qualidade da superfície acabada. A influência de cada uma das operações envolvidas foi estudada utilizando estratégias diferentes. Para a operação de aplainamento, foram estabelecidos três níveis, determinando valores diferentes para cada um dos principais parâmetros do processo (rotação da ferramenta, velocidade de avanço do material e profundidade de corte). Para a preparação da superfície no lixamento, foram estabelecidos dois níveis com uma configuração fixa. Finalmente,

como produto acabado, dois diferentes revestimentos transparentes foram selecionados sendo estes à base de água e à base de solvente. A avaliação quantitativa do estado da superfície foi verificada por meio de um sistema de processamento de imagem para a determinação da rugosidade da superfície da madeira. Um método de filtragem baseado em transformação rápida de Fourier foi aplicado sendo possível derivar três critérios para a avaliação do perfil resultante: critério de ondulação (K_{ond}) para avaliar a qualidade da superfície aplainada; critério de rugosidade (K_{rug}) para avaliar a qualidade da superfície lixada e critério subjetivo (K_{sub}) para avaliar a qualidade da superfície acabada.

2.2. Estudos sobre o processo de lixamento de madeiras

Com o objetivo de empregar lixamento automático de peças de móveis em superfícies curvas, Haruyama, Murase e Yanagawa (2002), desenvolveram um dispositivo flexível de lixamento (flexible sanding device - FSD). O equipamento foi produzido a partir do conceito do desenvolvimento de produção para testes experimentais. O desempenho do lixamento com relação à exatidão dimensional e acabamento superficial do material lixado automaticamente, foi examinado em uma peça de madeira da espécie “Sugi” (*Cryptomeria japonica* D. Don) com uma superfície curva (comprimento: 800 mm; largura: 180 mm; espessura: 30 mm e raio de curvatura 4.010mm) representando um tampo de gaveta de uma cômoda. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que o dispositivo de lixamento flexível pode ser usado como opção viável para lixamento automático de peças de mobiliário com superfícies curvas.

Em 2005, Saloni, Lemaster e Jackson realizaram uma revisão bibliográfica com o objetivo de caracterizar o processo de lixamento da madeira pela taxa de material removido e consumo de energia. Neste trabalho os autores relatam vários estudos e conclusões sobre os mesmos, como aqui descritos. Os processos de lixamento são difíceis de serem analisados e caracterizados por causa dos diversos tipos de equipamentos e variadas granulometrias de lixas disponíveis. Dois parâmetros são de grande importância na operação de lixamento: um é a quantidade do material

removido durante o processo, chamado taxa de material removido (MMR, pol^3/min ou m^3/min). O outro é a qualidade do acabamento superficial, parcialmente medido a partir da raiz quadrada média dos picos e vales (R_q) e geralmente expressa em micro polegadas (μin) ou micrometros (μm). A indústria moveleira, embora não seja uma grande consumidora de energia, deve ser considerada. Dentre os processos de processamento da madeira, o lixamento geralmente consome muita energia. Importantes pesquisas foram realizadas sobre o processo de lixamento da madeira, porém, a maioria dos projetos de pesquisas foi realizada há muitos anos e o processo de lixamento tem melhorado desde então. Em 1954, Franz e Hinken apresentaram os efeitos da pressão aplicada, velocidade da lixa, o teor de umidade na área de contato, vida da lixa e consumo de energia. Nakamura (1966) descobriu que a velocidade de avanço é inversamente correlata a taxa de madeira removida numa operação de lixamento com cinta. Por outro lado, Pahlitzsch (1970) detectou que a velocidade da cinta causa pouco efeito na qualidade do acabamento superficial, além de ser quase independente da pressão da cinta. De acordo com Stewart (1975,1974), a energia requerida por uma lixadeira é possivelmente relacionada a taxa de remoção do material, assim como possivelmente relacionada com a profundidade de corte e taxa de avanço da madeira a ser lixada. Carrano (1997) não encontrou interações significativas nos efeitos da operação de lixamento entre as variáveis estudadas (pressão, mineral abrasivo, espécies de madeira e orientação das fibras). Além disso, o tipo de abrasivo utilizado provou que foi significativo para o acabamento superficial, mas não para a taxa de remoção do material (MMR) utilizando lixas com granulometria maior. Outro estudo feito por Saloni et al. (2002) mostrou que a taxa de remoção de material foi quase sempre alta para lixas com abrasivo de óxido de alumínio, na realidade, quase duas vezes maior que as outras (carboneto de silício composto). Eles também confirmaram que a taxa de remoção de material aumenta à medida que a pressão aumenta. Adicionalmente, eles observaram que a rugosidade superficial não teve um comportamento previsível e/ou uma tendência específica para concluir uma tendência significativa para ambas as espécies e combinações de abrasivos estudados. Apesar de considerar o trabalho dos autores anteriores com o processo de lixamento da madeira, algumas pesquisas adicionais necessitam ser realizadas para a definição do

relacionamento entre diferentes variáveis durante o processo de lixamento incluindo a espécie da madeira, pressão, tipo de abrasivo, tamanho de grãos, além dos efeitos na taxa de remoção de material, rugosidade superficial e consumo de energia. O primeiro objetivo desta pesquisa foi obter um melhor entendimento dos abrasivos no processo de lixamento da madeira. A indústria da madeira requer conhecimentos adicionais das variáveis que afetam o processo de lixamento e a importância relativa das variáveis no processo.

Gurau, Mansfield-Williams e Irle (2005a) comentam que as superfícies de madeira lixada contêm irregularidades causadas pelo processo de lixamento e pela anatomia da madeira, ou seja, rugosidade anatômica, que é independente de qualquer operação de usinagem. Para avaliar corretamente o tratamento da rugosidade, as medições de irregularidades da superfície dado a anatomia da madeira, devem ser excluídas. Neste artigo, os autores investigaram os efeitos da anatomia da madeira sobre os parâmetros da rugosidade superficial das espécies “*oak*” e “*spruce*”, após o lixamento com lixa de granulometria 120. A anatomia da madeira é excluída do perfil da rugosidade usando um método desenvolvido por Gurau em 2004. O total de parâmetros de rugosidade, que contêm tanto a irregularidade do processamento quanto a anatomia da madeira, foram comparados com os parâmetros de rugosidade do processamento. O efeito da anatomia aumentou as medidas de rugosidade, em especial para a espécie “*oak*”.

Em outro trabalho, Gurau, Mansfield-Williams e Irle (2005b) relatam que qualquer avaliação quantitativa de uma superfície lixada exige que os dados sejam filtrados para remover os erros de forma e de ondulação. A superfície da madeira contém irregularidades devido tanto ao processo de lixamento quanto a sua anatomia, por isso a rugosidade anatômica deve ser excluída de qualquer medição da superfície, no caso da rugosidade gerada pelo lixamento, esta deve ser devidamente avaliada. Neste artigo, a eficácia de um conjunto de filtros padrão foi examinada para ver se eles estavam aptos para madeiras das espécies “*oak*”, “*beech*” e “*spruce*” com superfícies lixadas por lixas de granulometria 1000. Filtros nos padrões atuais apresentaram distorções, mas um filtro “Gaussian” rígido, seguindo um projeto normalizado, foi utilizado para apresentar rugosidade de perfis livre de distorções. A rugosidade

processada e a rugosidade anatômica, contidas no perfil filtrado, foram separadas com um algoritmo com base em um ponto inicial definido em relação à curva do material. Prosseguiu-se o trabalho comparando as propriedades de diferentes granulometrias de lixa e combinações de espécies. Em 2006, os mesmos autores investigaram a influência do comprimento do cut-off do filtro em parâmetros de rugosidade da madeira lixada, quando a superfície é filtrada com um filtro (do tipo Gaussian Regression Filter). Este filtro deve levar a perfis da rugosidade livre de distorções se o comprimento da interrupção é selecionado corretamente. Para as lixas de tamanhos de grão entre 120 e 180, que precedem geralmente aplicações do revestimento, um valor de uma interrupção de 2,5 milímetros foi tido como apropriado. Entretanto, um processamento mais fino com granulometria 1000 exigiu comprimentos maiores da interrupção para superar o efeito de distorções.

O grau de acabamento superficial e a intensidade de queima da superfície durante o lixamento perpendicular às fibras no plano transversal (direção 90-90) da madeira de *Fagus silvatica* L. foi verificado por Porankiewicz e Wieloch (2008). Vários parâmetros de usinagem foram examinados, como: rotação do disco de lixa; granulometria das lixas; pressão de lixamento; espessura e largura da espécie de madeira. O objetivo dos autores desta pesquisa foi definir os melhores agrupamentos entre os parâmetros de usinagem a fim de evitar as marcas de combustão na área de contato entre a lixa e a superfície da madeira.

2.3 Estudos sobre acabamento superficial de madeiras

Um estudo de usinabilidade da madeira de carvalho “*zeen*” foi desenvolvido em 1999 por Zerizer e Mansseri. Neste trabalho os autores compararam três parâmetros de corte: velocidade de avanço; velocidade de corte e profundidade de corte, com o objetivo de analisar a influência destes sobre a qualidade superficial desta espécie de madeira, empregando como métodos de medição a medida da rugosidade com apalpador mecânico (rugosímetro) e a análise da superfície por processamento de imagem. Neste trabalho foram realizados 32 ensaios de usinagem em uma tupia moldureira, dado por quatro séries de ensaio empregando-se duas rotações: 2500 e

5000 rpm, duas velocidades de avanço: 13 e 17 m/min e duas profundidades de corte: 3 e 7 mm. O processo foi conduzido empregando-se uma fresa de metal duro de diâmetro 120 mm com geometria dos dentes de 25° de ângulo de saída e 15° de ângulo de folga, usinando no sentido de corte discordante. Para medição da rugosidade da superfície usinada, adotou-se o parâmetro “Ra” como critério. No processamento de imagem, o sentido de aquisição das imagens se deu no mesmo sentido empregado pelo percurso da ferramenta e o critério adotado foi a média das diferenças entre os níveis na escala de cinza obtidos. Das oito combinações de ensaio, foram calculadas as espessuras de cavaco “Em” (entre 0,14 e 0,55 mm) e estas foram analisadas em função do valor de “Ra” obtido para cada espessura e em função das diferenças médias na escala de cinza. Analisando os resultados, os pesquisadores puderam concluir que tanto a rugosidade “Ra”, quanto a variação de níveis na escala de cinza, aumentam com o aumento da espessura de cavaco, chegando-se as seguintes relações por regressão linear dos pontos: $Ra = 1,12 + 2,51 Em$; Média níveis de cinza = $51,82 + 347,34 Em$.

A fim de prover informações sobre as relações entre os parâmetros de operação: taxa de remoção de material e rugosidade resultante, Taylor, Carrano e Lemaster (1999) avaliaram o impacto de combinações de níveis dos seguintes parâmetros: espécie da madeira; tipo de mineral abrasivo; pressão sobre as lixas e orientação do lixamento. Também foi avaliado o impacto das interações com respeito à característica de qualidade desejada da peça acabada para três diferentes granulometrias de lixa. Os resultados indicaram que o efeito individual da pressão foi significativo em todos os níveis de granulometria de lixas. Também, o carboneto de silício gerou uma superfície melhor que o óxido de alumínio com o maior tamanho de grão para todas as espécies ensaiadas.

Em sua dissertação de mestrado, Castro (2000) estudou a usinabilidade de chapas MDF, analisando o desempenho de corte em relação à qualidade da superfície usinada, a fim de se verificar a influência dos parâmetros estudados para operação de acabamento. Neste trabalho, o autor verificou a influência da espessura de corte, velocidade de avanço e sentido de corte, em operação de fresamento cilíndrico periférico, sobre a rugosidade superficial da borda das chapas MDF. Uma fresadora

vertical (tupia moldureira) com rotações nominais de 4000 e 6000 rpm foi utilizada para gerar as superfícies, cuja rugosidade superficial foi medida por um perfilômetro de apalpamento modelo Form Talysurf Series 120L, equipado com uma unidade transversal a laser e de uma ponta apalpadora de diamante, de forma cone-esférica, com raio de ponta de 2 μm . Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas 2 chapas de MDF, com dimensões de 2800x1800x15 mm com densidade média à base seca de 688 kg/m^3 e densidade à base úmida média de 748 kg/m^3 , as quais foram seccionadas em uma serra circular esquadrejadeira para a obtenção de 48 peças de 1400 x 60 mm, aplainadas posteriormente. Com duas laterais úteis em cada peça, foram obtidas 96 bordas. Os parâmetros de corte empregados foram: velocidades de avanço 2,90; 4,10; 5,80; 8,20; 10,90; 15,15, 21,80 e 30,30 m/min; sentidos de corte: discordante e concordante e profundidades de corte 1, 3 e 5 mm. Para se evitar influências do desgaste de ferramenta sobre as superfícies geradas, foram realizadas afiações programadas da aresta de corte a cada 8 superfícies medidas. Os parâmetros de rugosidade coletados e analisados foram: R_a (rugosidade média); R_q (média quadrática); R_p (maior pico); R_v (maior vale); S (distância entre picos) e R_z -ISO (média de 5 picos e vales). Os testes preliminares evidenciaram a necessidade da realização de medições ao longo de duas posições estabelecidas na espessura das chapas, já que o MDF possui um gradiente de densidade ao longo da espessura. As posições de medição adotadas foram central e periférica, localizadas a 7,7 e 2,0 mm da face da amostra. A partir da análise dos resultados obtidos, o autor identificou a influência de cada parâmetro de corte empregado. Paralelamente à análise dos resultados numéricos, todas as superfícies geradas das amostras foram visualizadas e analisadas. As superfícies usinadas com valores a partir de $f_z \cong 5$ mm, mostraram a ocorrência de destacamentos de blocos de fibras, ocasionando o aumento considerável da rugosidade superficial. Este fenômeno pôde ser verificado por meio das imagens dos corpos-de-prova em questão, ou por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma superfície correspondente. Como resultados, Castro relata que:

- A diferença da densidade ao longo da espessura do painel de MDF (camadas periférica e central) influencia na rugosidade superficial. As imagens, obtidas

por meio de MEV, mostraram a diferença da textura superficial nas diferentes camadas da espessura do painel de MDF. O teor mais elevado de resina, contido na camada periférica, foi facilmente visualizado a partir da presença de "placas" de resina, diferente dos traqueídeos devidamente cortados na camada central.

- Analisando o comportamento das curvas dos gráficos gerados, o autor concluiu que a rugosidade superficial aumenta com o acréscimo da profundidade de corte e do avanço por dente.
- Com relação ao sentido de corte, ao contrário do que ocorre na usinagem da madeira onde a rugosidade é menor no corte concordante devido ao deslizamento da aresta de corte na superfície usinada antes de atingir o final do corte, na superfície usinada do MDF, a rugosidade superficial entre os dois sentidos de corte é muito próxima, com uma tendência de ser maior para o corte concordante. No entanto, a rugosidade superficial passa a ser nitidamente maior para o sentido discordante para avanços por dente a partir de aproximadamente 5 mm, para rotação de 4320 rpm ($V_f = 21,6$ m/min).

Para entender o efeito dos principais parâmetros envolvidos no processo de lixamento periférico da madeira sobre a qualidade da superfície resultante, Carrano, Taylor e Lemaster (2002), desenvolveram um experimento onde foi avaliada a combinação das seguintes variáveis de entrada: espécies de madeira, velocidade de lixamento, taxa de avanço, profundidade de corte, tamanho de grão da lixa, desgaste e vida da lixa e orientação das fibras da madeira. Os resultados mostraram que o tamanho de grão da lixa, o desgaste da lixa e a orientação das fibras da madeira foram significativos para todas as espécies consideradas no estudo. A taxa de avanço mostrou significância para a espécie "*white oak*" e "*eastern white pine*" e a velocidade de lixamento só foi estatisticamente importante para "*white oak*". Os parâmetros de rugosidade de superfície que foram sensíveis às condições usinagem foram: "Ra", "Rq", e "Rz", enquanto os parâmetros "Rsk" e "Rku" não apresentaram resultados mensuráveis.

Em 2003, Siklienka e Ockajova estudaram a influência da força de corte por unidade de área de pressão específica durante o lixamento das espécies de madeira

escolhidas: “*pine*”, “*oak*”, “*maple*”, “*spruce*” e “*poplar*”, em três direções de lixamento referentes à direção das fibras, quais sejam: paralelo às fibras, com o ângulo de 60 ° e perpendicular às fibras. As medições experimentais foram realizadas numa lixadeira de cinta empregando-se as pressões específicas 1,04; 1,47; 1,86 e 2,06 N/cm². As granulometrias das cintas abrasivas utilizadas foram: 40; 80 e 120. Os resultados mostraram que os valores da força de corte por unidade de área aumentaram para cada tipo de madeira com pressão específica de corte na faixa de 1,04 a 1,86 N/cm².

O efeito do número de facas (lâminas de corte) no processo de aplainamento e do tamanho de grãos abrasivos da lixa no processo de lixamento, sobre a rugosidade superficial, foram avaliados por Burdurlu et al. (2005), empregando madeira das espécies “Lombardy poplar” (*Populus nigra* L.) e “European black pine” (*Pinus nigra* A.). Um total de 220 amostras de dimensões 20x20x20mm foram preparadas, sendo 100 amostras para ensaio de lixamento e 120 amostras para ensaios de aplainamento. Para os dois ensaios, foram testadas as direções de corte radial e tangencial. No aplainamento empregaram-se as velocidades de avanço de 5,0 e 9,0 m/min para o corte com 2; 3 ou 4 facas montadas no cabeçote e, no lixamento empregaram-se os seguintes tamanhos de grãos abrasivos: 60; 80; 120; 180 e 220. Após usinadas para os dois processos, as amostras foram submetidas a medições de rugosidade segundo a norma EN ISO 4288 TS 6212, para se determinarem os valores de rugosidade superficial “Ra”. Os valores obtidos foram analisados estatisticamente e os resultados foram interpretados. Os melhores resultados da rugosidade da superfície lixada foram obtidos com a lixa 180 sobre superfícies de corte tangencial para “Lombardy poplar” e com a lixa 220 sobre superfícies de corte tangencial para “European black pine”. Na superfície aplainada, o melhor resultado foi obtido no corte tangencial com 2 lâminas e avanço de 5,0 m/min para ambas as espécies.

Considerando que a qualidade superficial de compósitos de madeira, tais como painel de fibras e painel de partículas, desempenham importante papel quando utilizados como substrato para aplicações de revestimentos, quaisquer irregularidades na superfície do painel podem aparecer, mesmo que com aplicação de revestimento, reduzindo a qualidade do produto final. Portanto, é importante quantificar a rugosidade

da superfície das chapas com um método objetivo, a fim de garantir certa qualidade do revestimento do painel. Hiziroglu (2004) avaliou a rugosidade da superfície das chapas de partículas produzidas comercialmente. Os painéis de chapas de partículas fabricados a partir de “Loblolly pine” (*Pinus taeda* L.) foram utilizados para os experimentos. As medições da rugosidade foram tomadas a partir da superfície das espécies utilizando o método de apalpamento. Três parâmetros de rugosidade, ou seja, média de rugosidade (Ra), média da altura pico-a-vale (Rz) e rugosidades máximas (Rmax) foram considerados para determinar a qualidade superficial das amostras. Com base nos resultados deste estudo, verificou-se que não houve diferença significativa entre as medições de rugosidade realizadas a partir de superfície ao longo dos painéis e por meio das marcas da lixa. A variação nos valores dos parâmetros de rugosidade dentro e entre os tipos painel está dentro da gama esperada e comparáveis às de outros painéis de partículas fabricados comercialmente. Estes valores podem ser utilizados como uma ferramenta para melhorar a qualidade da superfície dos painéis, quer a partir da modificação das propriedades da matéria-prima ou dos parâmetros de fabricação, tais como pressão ou o conteúdo de resina.

Em trabalho publicado em 2006, Hendarto et al., comentam que devido à falta de homogeneidade do material da madeira, o perfil da rugosidade de uma superfície é afetado pela estrutura anatômica da madeira, implicando diretamente na análise da qualidade da superfície da mesma. Atualmente, não existe um método confiável para analisar a qualidade da superfície da madeira independente da espécie de madeira ou de suas propriedades. As proposições atuais de métodos de filtragem para determinar a rugosidade da superfície do perfil a partir da medição deste perfil não devem, por si só, justificar a produção de resultados confiáveis na análise superficial da madeira. Este trabalho propõe uma nova abordagem para superar esta deficiência, proporcionando métodos de análise de rugosidade da madeira mais precisos e confiáveis. Os métodos anteriormente propostos (Gaussian filter; Robust Gaussian Regression Filters - RGRF) são comparados com três outros métodos propostos neste trabalho, utilizando dados de 35 amostras de madeira “Messmate” (*Eucalyptus obliqua*) lixadas com sete diferentes tamanhos de grãos abrasivos (60, 80, 100, 120, 150, 180 e 240). As rugosidades superficiais medidas foram realizadas empregando-se rugosímetro de apalpamento,

medindo-se os parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz e Rmax. Os resultados sugerem que os métodos propostos são mais consistentes e precisos na descrição da qualidade da superfície lixada de madeira.

De Moura e Hernandez (2006) consideram que lixar é uma prática comum necessária para se preparar as superfícies da madeira para aplicação de revestimentos e que, pouca literatura se encontra disponível considerando o efeito dos parâmetros de lixamento sobre a qualidade das superfícies. Neste trabalho, foram avaliadas as superfícies de madeira da espécie “*Sugar maple*” em amostras que tinham sido lixadas usando dois tipos de minerais abrasivos (carboneto de silício e óxido de alumínio), três tamanhos de grãos (100; 120 e 150) e quatro velocidades de avanço (8; 10; 12 e 14 m/min). Os parâmetros de rugosidade, os danos causados na superfície e as propriedades de umedecimento das superfícies lixadas foram avaliados para mensurar a qualidade superficial. No lixamento com granulometrias 100 e 120, ambos abrasivos diminuíram o parâmetro de rugosidade em relação à madeira não lixada, bem como os danos superficiais. Utilizando o tamanho de grão 150, não foi observada melhoria significativa da rugosidade, enquanto que os danos superficiais ainda foram reduzidos. Com o aumento da velocidade de avanço obteve-se superfícies grosseiras devido ao aumento do desfibramento das células superficiais. Superfícies produzidas com lixas a base de carboneto de silício apresentaram um acabamento mais suave do que o obtido com lixas a base de óxido de alumínio.

Um estudo para avaliar o efeito de diferentes técnicas de usinagem sobre a rugosidade da superfície de madeira serrada foi desenvolvido por Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006), para as espécies “Beech” (*Fagus orientalis*) e “Aspen” (*Populus tremula*). A rugosidade da superfície das amostras foi medida empregando rugosímetro tipo apalpador, para 4 tipos de superfícies, sendo: somente serrada, somente aplainada e lixada para granulometrias de 60 e 80, de ambas as espécies. Neste trabalho foram utilizados os seguintes parâmetros para determinar as características das superfícies das amostras: Ra; Rz; Rk; Rpk e Rvk. Com base nos resultados da análise estatística, medições realizadas a partir da superfície nas direções tangencial e radial de ambas as espécies, não apresentaram diferença significativa numa mesma condição de usinagem, num nível de confiança de 95%. No entanto,

houve diferença estatística significativa de rugosidade superficial entre as duas espécies experimentadas, quando comparadas às quatro maneiras diferentes de usinagem, para ambas as orientações das fibras. Este estudo sugere que o método de apalpamento pode ser utilizado com sucesso para avaliar e distinguir variações na superfície de madeira, devido a orientação das fibras no aplainamento e lixamento. Os dados gerados por este estudo podem ser utilizados como uma ferramenta de controle de qualidade para demais processos, como acabamento ou colagem de madeira para as duas espécies.

Considerando que os compósitos de madeira contêm irregularidades na sua superfície devido ao processo de lixamento, cuja qualidade superficial tem um papel importante quando são utilizados como substrato para revestimentos, Hiziroglu e Kosonkorn (2006), desenvolveram um estudo para avaliar os parâmetros de rugosidade da superfície de painéis de MDF. Neste estudo foi utilizada a técnica de medição da rugosidade por apalpamento, onde os parâmetros de rugosidade R_a ; R_z e R_{max} foram medidos para avaliar quantitativamente as características superficiais das amostras. Empregando-se painéis de MDF confeccionados a partir das espécies “Rubberwood” (*Hevea brasiliensis*) e “Eucalyptus” (*Eucalyptus camaldulensis*), as rugosidades medidas foram tomadas no sentido de lixamento e no sentido transversal às marcas do lixamento, num comprimento de amostragem de 15,2 mm. O painel MDF de Eucalyptus apresentou os melhores valores de R_a , R_z e R_{max} para ambas as direções de medição da rugosidade.

Com o objetivo de fornecer dados técnicos para o melhor aproveitamento da madeira de eucalipto na produção de móveis, Lopes, et al (2008) determinou a qualidade da superfície usinada das madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunni* e *Eucalyptus urophylla* extraídas com 18 anos de idade. Para cada espécie, foram confeccionados 48 corpos-de-prova com dimensões nominais de 100 x 2,5 x 5 cm, e climatizados a 12% de umidade. A usinagem foi realizada em fresadora de eixo vertical com cabeçote de fresa com faca de aço rápido, com o auxílio de controlador de avanço empregou-se 7 diferentes velocidades de avanço: 3, 4, 6, 8, 11, 15 e 22m/min. As superfícies das amostras foram usinadas na direção paralela às fibras (90-0). Para medição da rugosidade foi empregado um rugosímetro Taylor Robson modelo

Suntronic 3+, adotando-se o parâmetro de leitura de rugosidade Ra. O *E. urophylla* apresentou os melhores resultados, ou menores valores de Ra para a maioria das velocidades: 3, 6, 8, 15 e 22m/min, o *E.dunni* apresentou os piores para as velocidades 3,4,6 e 8m/min, e o *E. grandis* apresentou comportamento mediano, sendo que para 3,8 e 11m/min não houve diferença significativa entre as médias.

2.4 Características e propriedades das madeiras: *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*.

A apresentação das características e propriedades das espécies de madeira utilizadas no presente estudo visa um melhor detalhamento da anatomia dessas espécies e de suas propriedades físicas e mecânicas, com vista as suas possíveis aplicações. Nogueira (1991) apresenta as especificações dessas características de 16 espécies de eucalipto. Desta fonte, foram extraídas as informações sobre as espécies objeto deste trabalho apresentadas a seguir e os resultados obtidos, apresentados em tabelas no ANEXO A.

Eucalyptus citriodora

É uma espécie que origina árvores com altura variando de 15 a 30 metros, tronco reto, liso, apresentando excelente fuste. A copa tem formato de guarda-chuva, a casca é fina, lisa, brilhante e de cor branca quando nova.

As folhas jovens são alternas, pecioladas, ovais e com ponta fina, munidas de pêlos sobre as nervuras e na borda da lâmina, medindo de 7 a 15 centímetros de comprimento por 3 a 6 centímetros de largura. As folhas adultas são altamente pecioladas, de ponta fina, duras, medindo de 10 a 25 centímetros de comprimento por 1 a 4 centímetros de largura. As folhas, tanto jovens como adultas, quando esmagadas exalam um forte e distintivo cheiro, parecido com essência de limão. As inflorescências ocorrem em grupos integrados por 3 a 5 flores. Os frutos são de 10 mm peciolados, de forma ovóide ou ligeiramente cilíndrica.

Esta espécie é originária da zona oeste de Queensland, Austrália. A qual se desenvolve melhor em regiões com latitude entre 17° a 26° S, de clima tropical a subtropical, resistindo até 0°C, precipitações anuais variando entre 600 a 1000

milímetros. Adapta-se em solos pobres com pedregulhos ou em solos vermelhos, profundos, argilosos e derivados de arenitos. A madeira é da cor castanho-parda a cinza-castanho escura. É considerada dura a muito dura e o seu peso específico encontra-se entre 0,9 a 1,1 g/cm³. Muito utilizada para cabos de ferramenta, extração de essências, postes e estruturas pesadas, como também em alguns casos de aplicação de marcenaria.

Eucalyptus grandis

É uma espécie que origina árvores com altura variando de 25 a 50 metros. É de rápido desenvolvimento, apresenta troco grosso, sua casca é fina, clara e quando desprende do tronco, deixa coloração branca e textura lisa.

As folhas jovens são alternadas pecioladas e apresentam a ponta fina e as bordas onduladas, medindo de 3 a 6 centímetros de comprimento por 1 a 3 centímetros de largura. As folhas adultas são alternadas, pecioladas, com ponta fina, onduladas, medindo de 13 a 20 cm de comprimento por 2 a 4 cm de largura. As inflorescências possuem de 3 a 10 flores.

Esta espécie desenvolve-se melhor em regiões de clima tropical a temperado resistindo até -5°C, com precipitações anuais variando de 1000 a 1800 milímetros. A madeira é de boa qualidade, de média densidade, seu peso específico encontra-se entre 0,6 a 0,7 g/cm³, e de cor rosada. Apresenta notável crescimento, principalmente em locais de clima tropical. Muito utilizada para estruturas, embalagens, marcenaria, celulose.

É uma espécie cuja madeira é susceptível ao ataque de insetos e fungos, e relativamente sensível ao fogo. Os troncos sobrevivem após a ocorrência de incêndios.

2.5 Conclusões sobre a revisão bibliográfica

Observou-se durante esta pesquisa bibliográfica a necessidade de definição de uma padronização na avaliação da superfície usinada da madeira e de materiais compostos de madeira pelo processo de lixamento. São vários os parâmetros que interferem no acabamento superficial da madeira tais como: espécie da madeira e suas características (físicas, mecânicas e anatômicas), processo de usinagem utilizado na

preparação da superfície, granulometria das lixas, direção das fibras da madeira, tipo de lixadeira entre outros. Tal preocupação se deve tendo em vista as exigências de mercado na questão da melhor qualidade do produto por um preço competitivo.

Sendo assim, pesquisadores têm desenvolvido trabalhos analisando a rugosidade superficial da madeira com o emprego de métodos como: rugosímetros; perfilômetros; raios “laser” e digitalização de imagens. Observou-se o estudo da relação entre os parâmetros de operação, incluindo-se a quantificação de material removido e consumo de energia, com a rugosidade resultante, porém sem uma metodologia padronizada. Observou-se também a análise de acabamento em espécies de madeira de reflorestamento utilizadas na indústria nacional verificando superfícies aplainadas e fresadas.

3 ASPECTOS TEÓRICOS E TECNOLÓGICOS

3.1 Sistema de corte da madeira

Em razão da estrutura ordenada da madeira, caracterizada por um crescimento orientado das fibras, dos vasos e raios, as propriedades físicas e mecânicas variam segundo a direção considerada. Os diferentes modos de cortar não podem ser abordados sem uma definição prévia do comportamento anisotrópico da madeira. Existem três direções principais relativas ao corte, padronizadas na literatura específica, como descritas a seguir:

Direção Longitudinal ou Axial: corte paralelo às fibras (notação 90 - 0);

Direção Radial: corte perpendicular às fibras (notação 0 - 90);

Direção Tangencial: corte perpendicular às fibras (notação 90 - 90).

Os diferentes sistemas de corte da madeira são definidos pela notação de McKenzie (1961 apud KOCH, 1964), conforme apresentado na Figura 3.1. O primeiro número da notação representa o ângulo da aresta de corte em relação à direção das fibras e o segundo número corresponde ao ângulo da direção do movimento em relação à direção das fibras, como especificado à seguir:

Corte 90-0: A aresta de corte faz um ângulo de 90° com a direção das fibras e a direção de movimento 0° com a direção das fibras. Como exemplificação, este sistema de corte ocorre em operações de serramento circular e de aplainamento de superfícies na direção longitudinal da madeira.

Corte 0-90: A aresta de corte está paralela à direção das fibras e a direção do movimento é perpendicular às fibras. Como exemplificação, este sistema de corte ocorre na operação de torneamento de lâminas de madeira.

Corte 90-90: A aresta de corte e a direção do movimento são perpendiculares à direção das fibras. Como exemplificação, este sistema de corte ocorre nas operações do processo de serramento por serra de fita.

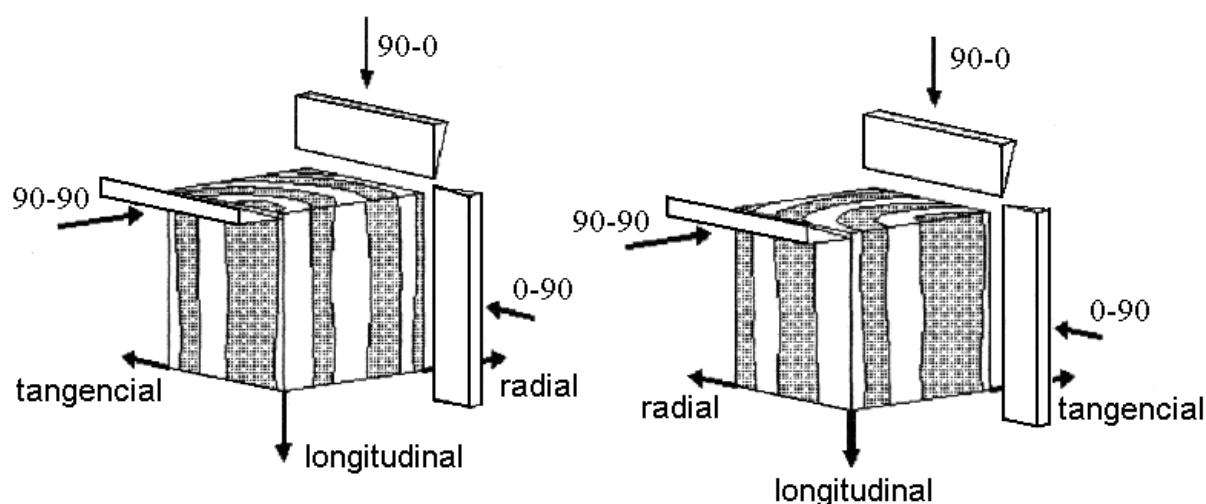


Figura 3.1 - Sistemas de corte com relação à seção transversal da madeira (KOCH, 1964, apud GONÇALVES, 2000, p.43).

Em 1975, Doi e Yokoyama apresentaram outra forma de classificação, combinando a direção de corte com a direção de penetração da aresta de corte em função dos sentidos de crescimento da madeira, axial e radial. Dezesesseis combinações são consideradas, conforme apresentado no Quadro 3.1. A ilustração dessas combinações de corte e direção de penetração numa amostra de madeira pode ser vista na Figura 3.2. Essas direções são representadas pela relação entre três eixos geométricos (Radial “R”, Tangencial “ θ ” e Axial “Z”) de uma peça de madeira serrada. O sinal positivo (+) ou negativo (-) é empregado para distinguir o sentido de crescimento da madeira nas direções “R” e “Z”.

Quadro 3.1 - Combinações das direções de corte com as direções de penetração da ferramenta (DOI; YOKOYAMA, 1975, apud GONÇALVES, 2000, p.44).

DIREÇÃO DE CORTE	DIREÇÃO DE PENETRAÇÃO		
	Direção Radial $R \pm$	Direção Tangencial θ	Direção Axial $Z \pm$
Direção Radial $R \pm$	--	$R \pm, \theta$	$R \pm, Z \pm$
Direção Tangencial θ	$\theta, R \pm$	--	$\theta, Z \pm$
Direção Axial $Z \pm$	$Z \pm, R \pm$	$Z \pm, \theta$	--

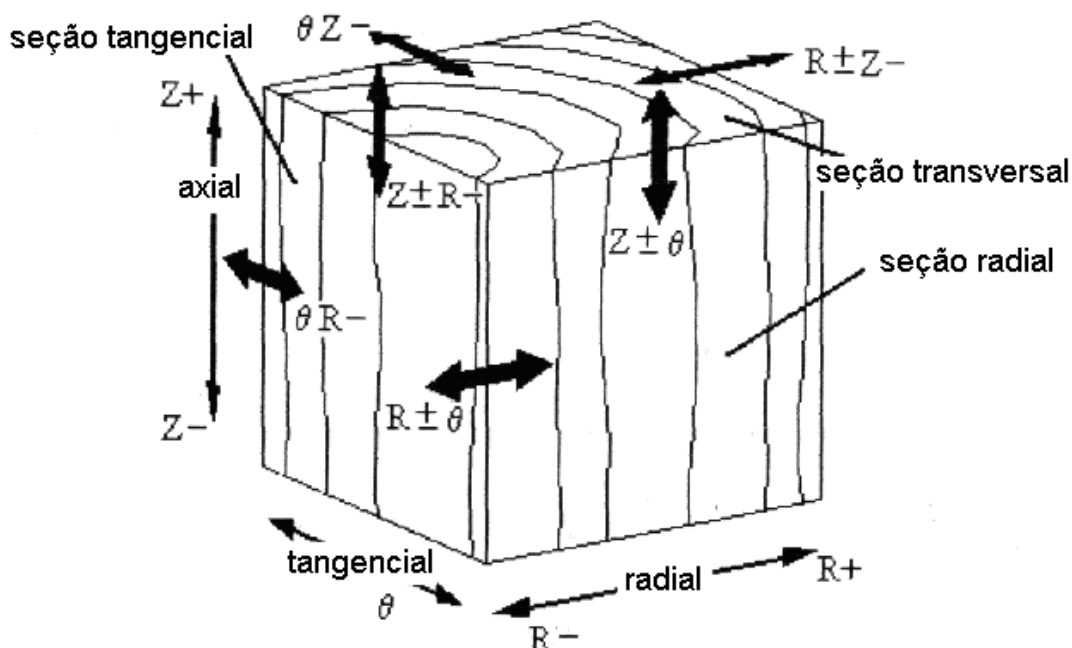


Figura 3.2. - Direções combinadas de corte e penetração nas seções de uma amostra de madeira (DOI, YOKOYAMA, 1975, apud GONÇALVES, 2000, p.45).

3.2 Lixamento

A função do processo de lixamento é regularizar a superfície da madeira preparando-a para receber a aplicação de materiais de revestimento. Também, este processo pode ser aplicado com a finalidade de melhorar a aparência do material permitindo sua aplicação “in natura” ou recebendo a aplicação de revestimentos incolores (vernizes) destacando ainda mais seu aspecto visual.

O processo de usinagem de lixamento pode ser dividido em duas classes. A primeira classe refere-se a regularização de uma superfície usinada anteriormente para uma nova superfície relativamente lisa e plana (operação de desbaste). A segunda classe refere-se à preparação de uma superfície para posterior aplicação de materiais de acabamento. O objetivo desta preparação é reduzir a profundidade das marcas de lixamento a fim de gerar uma superfície uniforme. Com relação às diferentes espécies de madeiras, pode-se afirmar que algumas espécies são mais difíceis de serem lixadas que outras. Porém, isto pode ser amenizado a partir da escolha correta do tipo de abrasivo e do tamanho dos grãos das lixas, bem como se adotando velocidades e pressões de lixamento ideais (KOCH, 1964).

A seguir são apresentados os principais conceitos para os elementos envolvidos na configuração das lixas empregadas no processo de lixamento das madeiras, descritos em sua maioria por Koch (1964) e complementado por Catai (2002) para o elemento “Adesivos”.

Silva (2003), em sua dissertação de Mestrado, desenvolveu um trabalho de gestão e tecnologia no tratamento de efluentes industriais utilizando como estudo de caso a Indústria Saint-Gobain Abrasivos S/A na unidade fabril instalada no município de Igarassu – PE a qual produz mensalmente 2 milhões de m² de lixas atendendo ao mercado da América do Sul, parte da Europa e Ásia. Dentre os objetivos do estudo, o autor reporta o processo produtivo das lixas.

3.2.1 Composição das lixas

Um estudo da estrutura dos abrasivos permite uma melhor compreensão das operações de usinagem. Os principais elementos envolvidos na configuração das lixas são descritos como: grão abrasivo; material de apoio (costado) e adesivos, conforme apresentado na Figura 3.3.

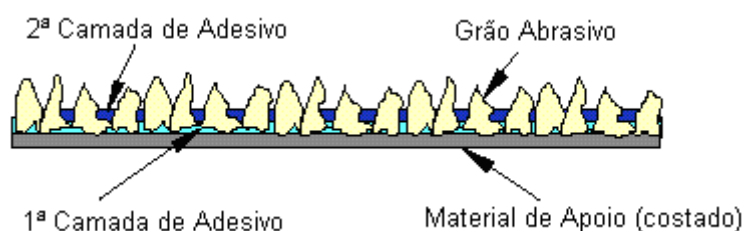


Figura 3.3 – Elementos envolvidos na configuração das lixas.

Abrasivos

A indústria de abrasivos classifica seis minerais importantes comercialmente. São eles: óxido de alumínio, óxido de ferro, dióxido de silício, composto de alumínio, óxido de ferro e sílica, óxido de alumínio e carboneto de silício. O óxido de alumínio é um mineral composto de óxido de alumínio - Al_2O_3 e magnetita (óxido preto de ferro Fe_3O_4) comumente usado na indústria metalúrgica como um agente de polimento de superfícies metálicas, porém, não utilizado na indústria madeireira. O óxido de ferro

ocorre na natureza e pode ser sinterizado. Este proporciona um polimento e desbaste médio e também não é usado na indústria madeireira. O dióxido de silício, um quartzo com coloração branco-acinzentado para rosa claro, encontrado em grandes depósitos naturais em diversas áreas da América do Norte, é um abrasivo usado geralmente em folhas de lixa para operação manual. Apesar de romper-se em fragmentos afiados e se tratar de material de baixo custo ele é muito pouco usado em aplicações industriais porque não possui a dureza e a durabilidade de outros materiais disponíveis. O óxido de ferro e sílica é uma mistura de silicato com ferro, alumínio, cálcio e magnésio. Sua cor é avermelhada. Quando esmagados, fornecem grãos em forma de cunha que são mais duros do que o dióxido de silício. Tem uma dureza de aproximadamente 7,5 na escala de dureza Mohs¹. Ele é mais duro do que o vidro e é um dos mais utilizados dentre os abrasivos naturais.

O óxido de alumínio e o carboneto de silício são processados industrialmente. O óxido de alumínio foi criado primeiramente em meados de 1900. É um derivado do minério de bauxita de cor castanho avermelhado. Esse minério aquecido em forno elétrico à aproximadamente 1920°C, juntamente com uma pequena quantidade de coque (resíduo de carvão mineral) e limalha de ferro, produz um lingote que pode conter aproximadamente 50% de óxido de alumínio. Quando triturado, o óxido de alumínio forma grãos pesados tendo partículas em forma de cunha com dureza de 9,5 na escala Mohs e densidade de 3,96g/cm³. As partículas de óxido de alumínio são as de maior dureza dos abrasivos em discussão e são menos ásperas e duras que as de carboneto de silício. Em combinação com uma liga de resina, o óxido de alumínio tem elevada resistência à ruptura e, por isso, tem grande aceitação na aplicação de lixamento que requer altas pressões. O Carboneto de silício tem cor preta azulada, foi produzido experimentalmente em meados de 1890. É fabricado comercialmente, a partir da combinação de uma mistura de areia (dióxido de silício), resíduo de carvão mineral e uma pequena quantidade de sal e serragem num forno de resistência elétrica a uma temperatura de aproximadamente 2200°C. A serragem torna a massa porosa e ajuda na saída de monóxido de carbono. O sal ajuda a remoção de impurezas de ferro

1 – MOHS: Escala de MOHS, é uma escala relativa de dureza desenvolvida em 1812 pelo mineralogista alemão Frederich Mohs (1773-1839).

formando um cloreto volátil. Os cristais de carboneto de silício formados em torno do eletrodo, têm uma dureza na ordem de 9,6 na escala Mohs e uma massa específica de 3,2g/cm³. Quando estes cristais são resfriados e triturados, os grãos resultantes são acentuadamente pontiagudos, e as partículas têm a forma de cunha. Embora o carboneto de silício seja o mais duro e áspero dos minerais utilizados na fabricação de abrasivos, ele é o que mais rapidamente se desgasta devido a sua fragilidade. Tem excelente aplicação em operações de lixamento leve, tais como a remoção de fibras da madeira expostas após um lixamento anterior. É também um eficiente abrasivo para lixar chapas de madeira e painel de partículas, que contem revestimentos de resina.

Os tamanhos das partículas que são usados nos revestimentos abrasivos são estabelecidos por peneiramento dos grãos em telas de determinada malha. A espessura da malha determina a denominação do composto de alumínio, do óxido de alumínio e do carboneto de silício. A tela mais fina tem 220 aberturas para cada polegada linear ou 48.400 aberturas por polegada quadrada. Grãos mais finos do que isto são segregados por sedimentação ou flutuação pelo ar. Os tamanhos dos grãos variam de 12 (mais grossos) até 600 (mais finos). Na nomenclatura do sistema utilizado anteriormente, as dimensão das partículas de dióxido de silício e o óxido de alumínio variavam de 4 para 400. A relação entre os dois sistemas de numeração são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Comparativo das granulometrias empregadas em lixas para trabalho em madeira, (KOCH, 1964)*.

Descrição atual baseada na malha da tela	Sistema antigo	Descrição atual baseada na malha da tela	Sistema antigo
12	-	120	3/0
16	4	150	4/0
20	3 ½	180	5/0
24	3	220	6/0
30	2 ½	240	7/0
36	2	280	8/0
40	1 ½	320	9/0
50	1	360	-
60	½	400	10/0
80	0	500	-
100	2/0	600	-

* Carboneto de silício está disponível em lixas de granulometrias de 12 até 600. O óxido de alumínio e Oxido de ferro e sílica estão disponíveis de 16 até 400 (com exceção do tamanho 360). O dióxido de silício está disponível nas granulometrias 24 até 320.

Material de Apoio das Lixas (Costado)

Conhecido comercialmente como “costado” o material de apoio é a base sobre a qual o produto se constitui como mostra a Figura 3.3. Papel, tecido, fibras vulcanizadas e combinações desses elementos são usados como costado da lixa. O Quadro 3.2 apresenta o sistema de classificação utilizado para identificar os tipos de costados.

Quadro 3.2 - Costados empregados para revestimento abrasivo (KOCH, 1964)

Letra indicadora	Peso por resma* (libras)	Forma do produto
A	40	Papel
C	70	Papel
D	90	Papel
	110	Papel combinado com tecido
E	130	Rolos e cintas de papel

* Uma resma padrão é definida como 480 folhas medindo 24 x 36 polegadas.

Materiais com pesos de até 90 libras são usados para fazer lixas de uso manual ou para máquinas lixadeiras orbitais. O material de 40 libras encontra a sua melhor aplicação no lixamento em superfícies curvas, pois é necessário o uso de uma folha flexível para se conformar com a superfície da peça. As lixas de 70 a 90 libras são mais rígidas e proporcionam uma remoção de material mais agressiva em superfícies planas ou quase planas. O papel de 110 libras, combinado com um tecido, resulta num costado com uma tela resistente utilizável normalmente em lixadeiras cilíndricas.

Lixadeiras cilíndricas e lixadeira de cinta larga utilizam papel de 130 libras como material de suporte padrão. Papéis de 100 libras ou menos são confeccionados de uma única camada de papel “Kraft” fabricados numa máquina do tipo “Fourdrinier” a partir de fibras de madeira. Papeis de peso acima de 100 libras podem ser de 4 ou 5 camadas e são feitas em uma máquina equipada com cilindro a partir de juta ou de fibras de cânhamo. Estes materiais são particularmente adequados para cintas e manta de tambor de lixamento, por serem resistentes aos elevados esforços na direção longitudinal.

Silva (2003) apresenta o Quadro 3.3, empregado atualmente, relacionando a gramatura do papel do costado às suas características e aplicações.

Quadro 3.3 – Gramatura e aplicações (atualização), (SILVA, 2003).

Gramatura	Características	Aplicações
70 g/m ²	Flexível e Leve	Operações manuais e em lixadeiras portáteis, a seco ou refrigeradas.
90 g/m ²		
110 g/m ²	Flexível e Resistente	Operações mecanizadas em geral. Desbaste e acabamento
150 g/m ²		
220 g/m ²	Pesado	
280 g/m ²		

Adesivos de Ligação

É todo o material orgânico ou mineral, natural ou sintético, utilizado para fixar os grãos abrasivos ao costado. Existem dois tipos de adesivos: a resina, presente nas lixas utilizadas em máquinas lixadeiras, e a cola, empregada para as lixas manuais.

Resinas, empregadas nas lixas a serem utilizadas tanto em desbaste pesado, como semi-acabamento e acabamento.

Cola Animal é utilizada em lixas para operações manuais e em operações mecânicas onde existe baixa geração de calor.

Silva (2003) descreve o uso de adesivos na fabricação das lixas. A primeira etapa envolve a preparação do adesivo que irá fixar o grão ao costado. Em seguida o adesivo é aplicado em duas fases chamadas respectivamente de “Maker” (primeira camada) e “Sizer”(segunda camada). Genericamente pode-se dividir a matéria prima utilizada em cada fase, conforme apresentado dos Quadros 3.4 e 3.5:

Quadro 3.4 – Matéria prima do adesivo Maker (SILVA, 2003).

TIPO DE LIXA	PRINCIPAIS MATERIAIS USADOS
Lixa ferro	Resinas de origem animal, água, pigmentos e aditivos
Lixa massa / madeira	Resinas de milho, cargas, pigmentos, aditivos e água
Lixa d'água	Resinas alquídicas, cargas, xileno e aditivos

Quadro 3.5 – Matéria prima do adesivo Sizer (SILVA, 2003).

TIPO DE LIXA	PRINCIPAIS MATERIAIS USADOS
Lixa ferro	Resina uréia-formol, água, e aditivos
Lixa massa / madeira	Resina uréia-formol, água, cargas e aditivos
Lixa d'água	Resina fenólica, água, cargas e aditivos

3.2.2 O processo de fabricação das lixas

A Figura 3.4 ilustra a seqüência de operações envolvidas na fabricação de abrasivos revestidos. Após a impressão do costado, com informações incluindo o nome do produto, mineral e granulometria, o material contínuo recebe a primeira camada de adesivo. O revestimento mineral é então aplicado de modo a assegurar o peso específico do abrasivo dentro dos limites determinados. Posteriormente, o costado é continuamente seco em um forno. Em seguida o costado passa através de um segundo processo o qual se aplica a segunda camada de adesivo. Finalmente a secagem é realizada numa base contínua, em um segundo forno.

Existem dois métodos básicos de aplicação das partículas minerais no costado. O primeiro método é o da gravidade, que atinge bom nível de orientação do mineral, obtido pela agitação do material de apoio causando acomodação uniforme das partículas. No segundo método, ou método eletrostático, o mineral é depositado em uma cinta de movimento contínuo que passa entre dois eletrodos. O costado de material abrasivo passa próximo e abaixo do eletrodo positivo movimentando-se através de um campo eletrostático. Conforme as partículas abrasivas na parte inferior entram no campo eletrostático, tornam-se polarizadas. O eletrodo positivo atrai o lado negativo de cada partícula, fazendo com que a partícula fique encaixada em uma posição vertical na camada adesiva do revestimento no costado.

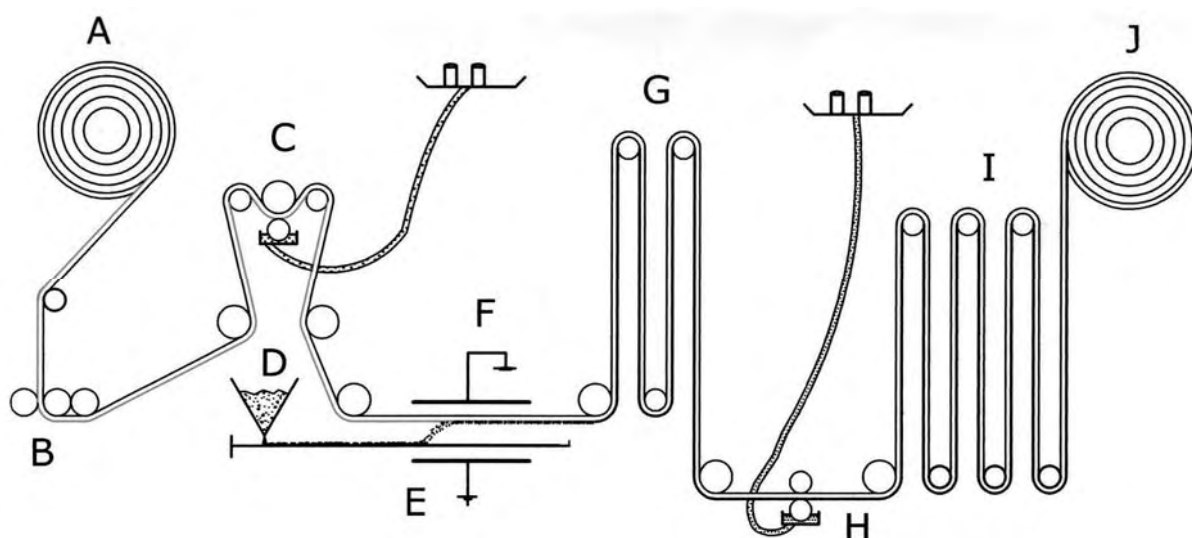


Figura 3.4 – Diagrama das operações contínuas que envolvem a fabricação de lixas. **A.** Costado; **B.** Impressão; **C.** Aplicação de adesivo de ancoragem; **D.** Grãos; **E.** Eletrodo eletrostático negativo; **F.** Eletrodo eletrostático positivo; **G.** Estufa Intermediária; **H.** Aplicação de adesivo de cobertura; **I.** Estufa principal; **J.** Abrasivo acabado. (Adaptado de KOCH, 1964 e SILVA, 2003)

Na lixa de revestimento abrasivo fechado, as partículas abrasivas cobrem completamente o adesivo do costado. O tratamento de revestimento aberto requer um espaçamento controlado das partículas minerais sobre o costado de forma que o peso total do mineral aplicado seja da ordem de 60 por cento do que o utilizado em lixas de revestimento fechado. Lixas de revestimento aberto são mais flexíveis e tem menor tendência de obstrução do que as lixas de revestimento fechado. Pelo fato da lixa de revestimento fechado ter mais minerais expostos, ela pode ter uma vida mais longa do que a lixa de revestimento aberto quando lixar espécies de madeira que não tendem a obstruir a superfície abrasiva.

Após o término do processo de produção das lixas, estas são submetidas ao flexionamento. O objetivo do flexionamento é oferecer diferentes graus de flexibilidade nos revestimentos abrasivos pela ruptura controlada do adesivo. A Figura 3.5 ilustra os três padrões de flexionamento. Um determinado produto será mais flexível, se for adotado o padrão de flexionamento total com as linhas de fratura da camada bem fechadas, e menos flexível, se adotado o padrão de flexionamento simples com as linhas de fratura mais espaçadas.



Figura 3.5 – Tipos de flexionamento, adaptado de Koch (1964).

Quanto ao formato das lixas para trabalho em madeira, estas estão disponíveis em folha, rolo, e de formatos especiais. O comprimento padrão de rolos é de 50 metros. O material abrasivo pode ser obtido, em praticamente qualquer tamanho. Em forma de cintas contínuas unidas por adesivos e pressão num ângulo de 45 graus aproximadamente. A área de junção do abrasivo é feita em operação de corte angular resultando num chanfro de modo que a espessura desta junção, após a colagem, é a mesma que a espessura do restante da cinta. Cones especiais, bobinas, e rolos são obtidos com contornos predefinidos conforme o perfil da superfície a ser lixada.

3.3 Rugosidade superficial

Dependendo do tipo de superfície e do material avaliado, a definição da qualidade superficial pode ter um significado diferente, conforme o comprimento de amostragem. Maldonado (1998) define geometricamente seis níveis de irregularidades de forma e de estado de uma superfície usinada, conforme descrito a seguir. A Figura 3.6 apresenta quatro desses níveis.

- 1ª ordem: diferenças de forma e de posição que indicam uma zona de tolerância em relação a um referencial específico;
- 2ª ordem: caracteriza as ondulações de um perfil, de caráter periódico devido às vibrações de baixas frequências da peça ou da ferramenta;
- 3ª e 4ª ordens: a rugosidade em si, regular ou de alta frequência, decorrente do avanço, da geometria e qualidade de afiação da ferramenta, e do material;
- 5ª e 6ª ordens: dependem da estrutura físico-química, além do domínio da metrologia

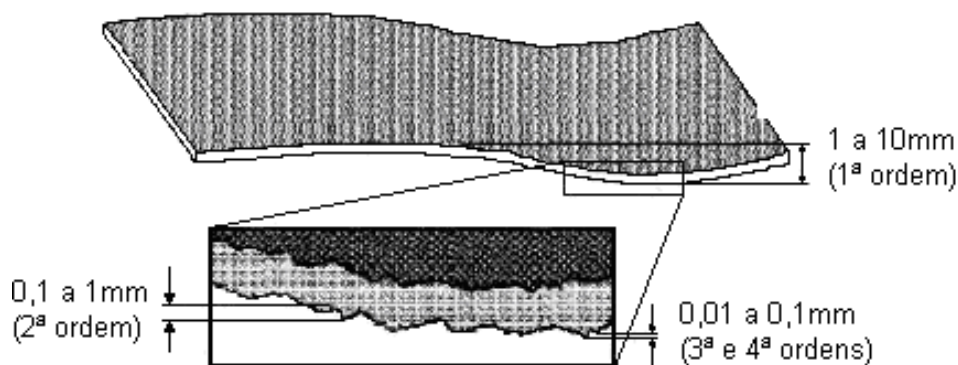


Figura 3.6 - Níveis de irregularidades superficiais para produtos à base de madeira, adaptado de Maldonado (1998).

Para a avaliação desses níveis de irregularidades, existem inúmeras técnicas de medição, tais como: apalpamento mecânico, técnicas óticas paramétricas (perfilometria e interferometria) e não-paramétricas (dispersão de luz), microscopia, emissão acústica, ultra-som, técnica pneumática e capacitância. No Quadro 3.6 é traçado um comparativo entre alguns métodos de medição (LEMASTER; BEALL, 1996).

Quadro 3.6 - Técnicas de medição de irregularidades superficiais aplicáveis a superfícies de materiais à base de madeira, Lemaster e Beall (1996).

TÉCNICA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Apalpamento mecânico ou “stylus”	Alta resolução.	Baixa velocidade, método de contato, análise bidimensional, pode usinar a superfície, insensível a fibras individuais e expostas.
Pneumático	Sensível a fibras individuais, análise tri-dimensional.	Sensível a porosidade, método de contato, não fornece o perfil real
Emissão acústica	Análise tri-dimensional, sensível as fibras, alta velocidade.	Método de contato, não fornece o perfil real.
Ótica	Alta velocidade, sem contato, alta resolução	Análise bi-dimensional, (linha estreita da amostra), insensível a fibras individuais expostas.

A rugosidade superficial de um material, segundo Lemaster e Beall (1996), pode ser função da sua própria natureza, do processo de manufatura aplicado ao material, ou uma combinação dos dois. As características do processamento que afetam a textura superficial são: a imprecisão da máquina-ferramenta, as condições da ferramenta, a vibração da ferramenta ou da peça-obra e a geometria de corte.

3.3.1 Critérios para avaliar a rugosidade

Consta na ABNT (NBR 6405/1988), que apresenta critérios para a avaliação de qualquer material, uma série de conceitos e padrões importantes na condução de medições de rugosidade superficial.

Comprimento de amostragem, l_e (Cut-off)

Chama-se comprimento l_e de comprimento de amostragem. Como o perfil efetivo apresenta rugosidade e ondulação, o l_e filtra a ondulação. É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros devam medir 5 comprimentos de amostragem (l_m :

comprimento de medição) e devem indicar o valor médio. A Figura 3.7 apresenta os comprimentos considerados para avaliação da rugosidade.

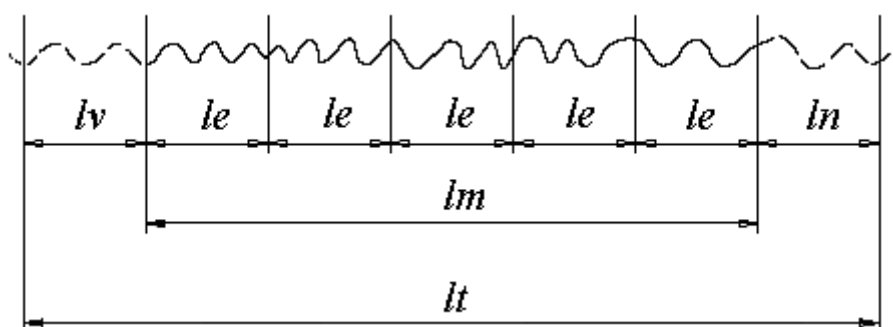


Figura 3.7 – Comprimentos para a valiação de rugosidade (ABNT - NBR 6405/1988).

l_m : comprimento do percurso de medição - extensão do trecho útil do perfil de rugosidade utilizado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média;

l_t : comprimento total de medição;

l_v : comprimento para atingir a velocidade de medição e l_n : comprimento para parada do apalpador - extensão da primeira e última parte do trecho apalpado não utilizado na avaliação, com a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas do sistema e ajuste de centro do perfil de rugosidade.

Na medição da rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem, conforme Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Tabela de comprimento da amostragem (CUT OFF) (ABNT - NBR 6405/1988).

Rugosidade RA (μm)	Mínimo comprimento de amostragem Le (CUT OFF) (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10,0	2,5
Maior que 10,0	8

Sistemas de medição da rugosidade superficial

São usados dois sistemas básicos de medida: o da linha média M e o da envolvente. O sistema da linha média é o mais utilizado. Alguns países adotam ambos os sistemas. No Brasil, pelas Normas ABNT NBR 6405/1988 e NBR 8404/1984, é adotado o sistema M. Linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no

comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (le).

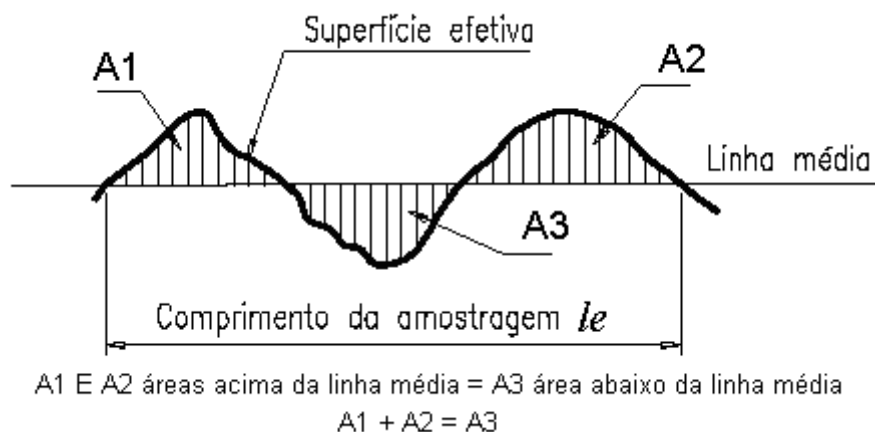


Figura 3.8 - Linha média e áreas mínimas superiores e inferiores.

3.3.2 Parâmetros de rugosidade superficial

Considerando-se a dificuldade em se realizar uma caracterização tridimensional, a rugosidade é avaliada segundo as propriedades de um perfil bidimensional, (Jouaneh, 1989). Essas duas dimensões, fisicamente representadas pela frequência e pela amplitude são fundamentais para medição da rugosidade superficial (PETERS; CUMMING, 1970). Uma classificação geral dos parâmetros de medição de rugosidade pode ser feita como apresenta FORM Talysurf Series Operator's Handbook (1985), dividindo-os em três grupos:

Parâmetros de amplitude: são medições dos deslocamentos verticais do perfil;

Parâmetros de espaçamento: são medições de espaçamentos irregulares ao longo da superfície, independente da amplitude dessas irregularidades;

Parâmetros híbridos: relacionado tanto com a amplitude como o espaçamento das irregularidades superficiais.

Utilizando-se das técnicas de medição disponíveis, os dados de rugosidade superficial são obtidos, e em seguida interpretados de acordo com o parâmetro de avaliação adotado.

Em 2009, Arencibia, em seu trabalho apresentado no 1º Seminário de Metrologia promovido pela Universidade Federal de Uberlândia, “Tolerâncias Geométricas”, apresenta uma atualização na especificação de termos, definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície, bem como, regras para seleção do comprimento de onda (CUT OFF), especificações geométricas do produto (GPS), método do perfil e calibração de instrumentos de medição por contato, com base nas normas: NBR ISO 4288 de Novembro de 2008; NBR ISO 4287 de Setembro de 2002 e NBR ISO 12179 de Agosto de 2002. A seguir são apresentados os parâmetros mais utilizados:

Ra - Rugosidade média:

É o parâmetro mais utilizado. Matematicamente é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m). Este parâmetro de avaliação da rugosidade superficial (Figura 3.9) está representado na equação (1).

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (1)$$

onde $y(x)$ é a função das ordenadas de afastamento.

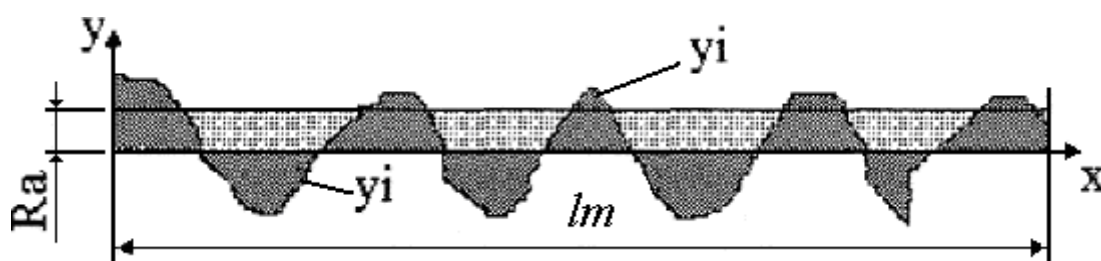


Figura 3.9 - Rugosidade média Ra ; y_i é o valor de um pico ou vale (ABNT NBR 6405/1988).

Rq – Média quadrática: raiz quadrada da média dos valores das ordenadas $Y(x)$, no comprimento da amostragem.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx} \quad (2)$$

Se a forma do perfil for senoidal, Rq é aproximadamente $1,11R_a$, independente dos parâmetros da senóide.

Instrumentos antigos mediam por essa relação mas, na realidade, os perfis práticos são muito distantes da senóide e, portanto, a aproximação resultava em erros grosseiros. Instrumentos atuais fazem o cálculo por digitalização.

A média quadrática Rq, na prática, é usada apenas para superfícies de sistemas ópticos, por ter uma melhor relação com qualidade ótica dos materiais.

Rv – Profundidade máxima do vale do perfil

Este parâmetro toma como referência a linha média do perfil e analisa o vale mais profundo em relação a mesma no comprimento de amostragem (le), como é mostrado na figura 3.10.

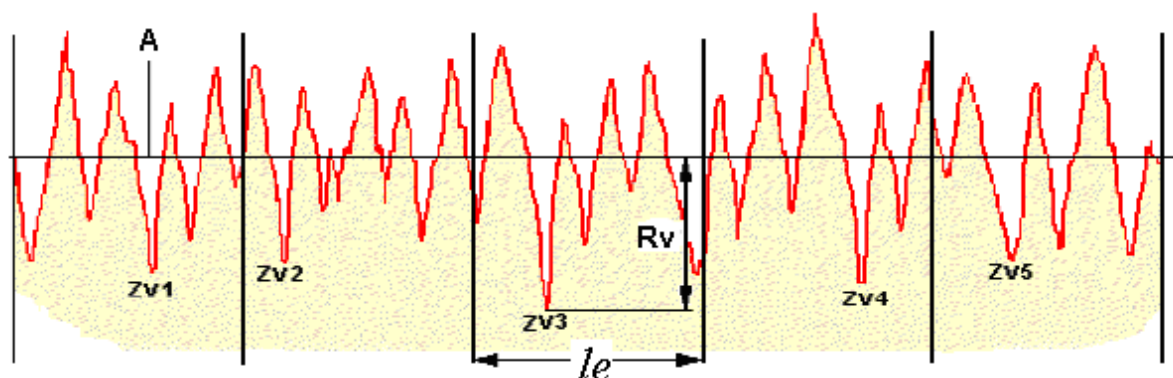


Figura 3.10 – Rugosidade Rv.

Onde,

A= linha média

le = comprimento da amostragem

Seu emprego está em superfícies que precisam ter características de retenção de fluido.

R_p - Altura máxima do pico do perfil

Este parâmetro está relacionado ao maior pico da análise em relação a linha média no comprimento de amostragem (le).

Seu emprego é similar ao parâmetro R_t e os resultados das medições são mais estáveis.

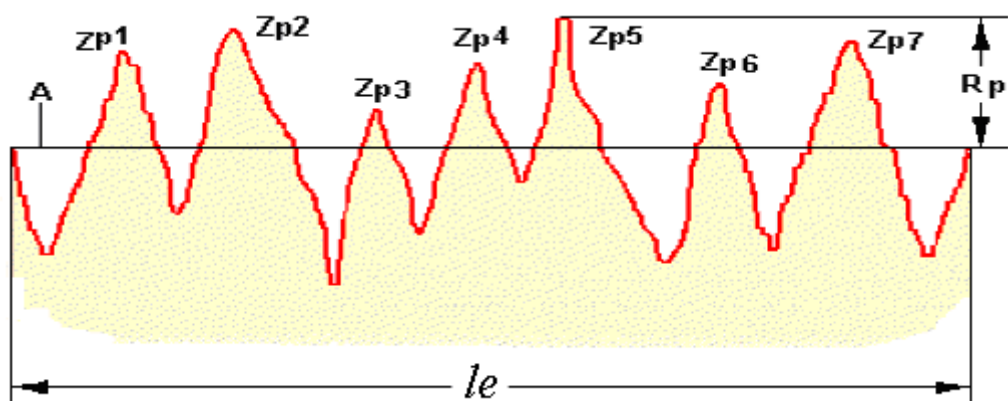


Figura 3.11 – Rugosidade R_p .

R_t – Altura total do perfil

Este parâmetro define a altura máxima de um pico a um vale no percurso de medição (lm), ou seja, a amplitude máxima entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação.

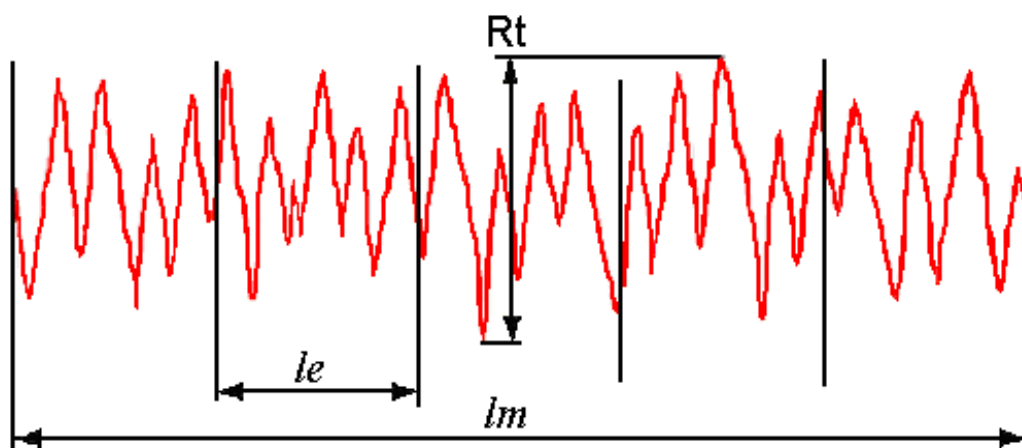


Figura 3.12 – Rugosidade R_t .

O emprego do parâmetro R_t depende do tipo da superfície a ser analisada, por exemplo, em superfícies que serão sedes de retentores, não é conveniente a presença de grandes amplitudes entre picos e vales.

R_z – Profundidade média

Também conhecido com R_{tm} é distância vertical entre o pico mais alto e o mais profundo vale dentro do comprimento de amostragem. É a média aritmética dos R_{zi} em amostragens consecutivas, ou seja, é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média existentes no comprimento de amostragem

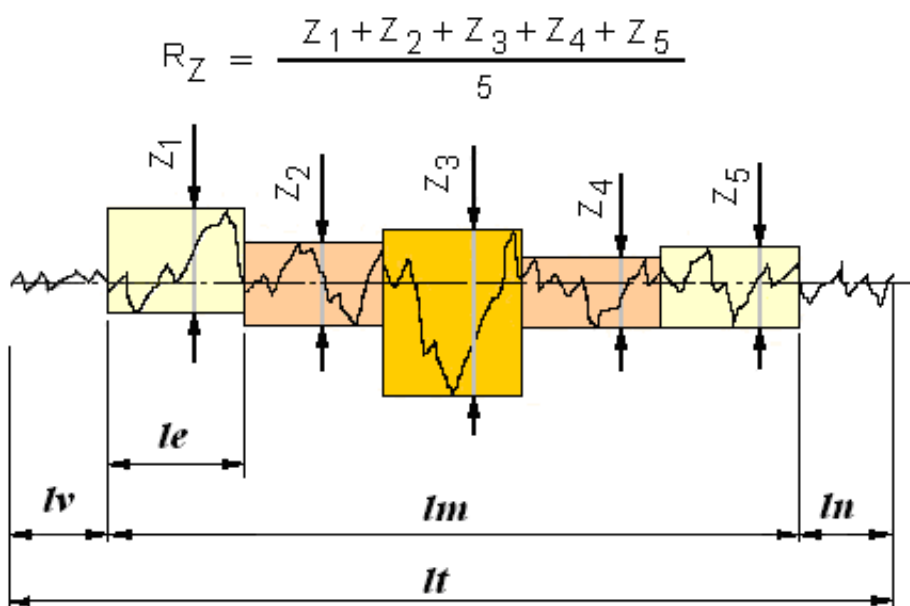


Figura 3.12 – Rugosidade de profundidade média R_z .

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Preparação das amostras de madeira

As amostras de madeira foram confeccionadas a partir de duas espécies de madeira de reflorestamento, de grande aplicação industrial, quais sejam: *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*, com densidades aparentes médias, respectivamente, de $1,00 \text{ g/cm}^3$ e $0,63 \text{ g/cm}^3$, referidas as amostras de madeira no estado de umidade em equilíbrio ($12\% \pm 4\%$).

As peças de madeira, objeto desta dissertação, foram adquiridas em uma serraria no município de Bauru-SP, no formato de pranchas de 50,0 mm de espessura, largas de 100; 150; 200 e 250 mm e comprimentos de 1,20; 1,50 e 1,80 m, num total de $10,0 \text{ m}^3$ ($5,0 \text{ m}^3$ de cada espécie) no estado de umidade saturado, com teores de umidade à base úmida acima de 30%, obtido pela medição por amostragem do lote de madeira. Tais pranchas (Figura 4.1) foram submetidas à pré-secagem pelo método de ventilação forçada ao ar em condições de temperatura ambiente, até que atingissem teores de umidade próximos a 20%. A Figura 4.2 ilustra o equipamento de secagem.



Figura 4.1- Detalhe das pilhas de madeira serrada após recebimento.



Figura 4.2 - Vista geral do equipamento - Módulo de Secagem por ventilação.

Especificação do secador:

- Ventilador-rotor centrífugo cilíndrico de dupla aspiração com saída retangular medindo 1,10 m x 0,90 m, 36 pás, marca BASI, modelo EC-84;
- Motorização: potência 5,0 CV;
- Compartimento do túnel: 1,10 m x 0,90 m x 9,00 m (Vazão média: 5,04 m³/s).

Após pré-secagem das pranchas, estas foram submetidas a aplainamento em ambas as faces e posteriormente ao corte longitudinal em processo de serramento circular empregando-se uma Serra Circular Multilâminas de cabeçote único e eixo inferior, ilustrada na Figura 4.3 e especificada a seguir.



Figura 4.3 - Vista geral da Serra Circular Multilâminas, empregada para usinagem de desdobro das pranchas.

Especificação da Serra Circular Multilâminas:

- Marca GAUER-MAQ, modelo ET - 300;
- Motorização de avanço: 1,5 CV, 1720 rpm;
- Velocidade de avanço: 10,08 m/min
- Motorização do cabeçote: 12,0 CV, 3530 rpm;
- Velocidade de corte para serras de 250 mm de diâmetro: 45,6 m/s
- Ferramenta: serra circular com dentes de metal duro de perfil inclinado alternado (WZ), diâmetro 250 mm, espessura dos dentes 3,2 mm, 20 dentes.



Figura 4.4 - Vista geral do processo de usinagem de desdobro das pranchas.

Após seccionamento das pranchas em sarrafos, estes foram submetidos ao processo de aplainamento em plaina desempenadeira e desengrossadeira, definindo-se uma secção transversal das peças de 42,0 x 42,0 mm, com superfícies isentas de irregularidades quanto ao empenamento (Figura 4.5). Com a secção transversal quadrada, as peças foram seccionadas no comprimento em Serra Circular Destopadeira para padronização nas dimensões de 1,20; 1,50 e 1,80 m, a fim de se controlar o parâmetro de comprimento contínuo de usinagem no processo de torneamento em torno tubular.

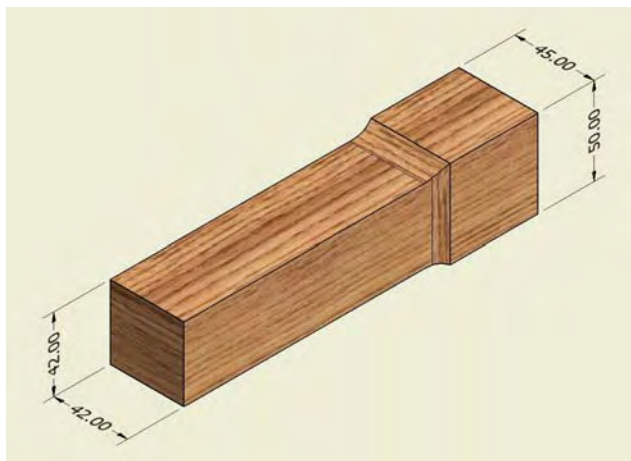


Figura 4.5 - Representação gráfica de um corpo-de-prova submetido ao aplainamento.

As peças de madeira depois de aplainadas foram novamente submetidas na forma de pilhas entabicadas (camadas espaçadas por tabiques) ao processo de secagem por ventilação (Figura 4.6), até atingir variações em seu teor de umidade próximo da faixa de umidade de equilíbrio referido ao peso úmido, qual seja $12\% \pm 4\%$, medida e controlada pelo instrumento de medição do teor de umidade ilustrado na Figura 4.7, especificado a seguir:

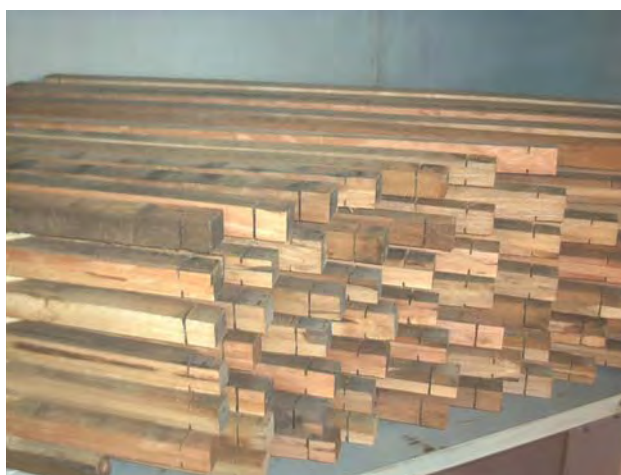


Figura 4.6 – Sarrafos acondicionados no túnel do secador.

Especificação do Medidor de umidade:

- Marca DIGISYSTEM, modelo DL 822;
- Faixa de medição de 8% a 60% à base seca;
- Capacidade de resolução de 0,1 %;

- Visor de cristal líquido com 3,5 dígitos;
- Marteleto de medição com 4 eletrodos fixados em base de acrílico.



Figura 4.7 - Detalhe de medição de umidade em peça de madeira de *Eucalyptus grandis* após secagem por ventilação forçada (teor de umidade registrado de 13,2 %).

Definidas as condições de usinagem mais adequadas (velocidade de corte e de avanço) para a preparação das amostras do experimento de lixamento, as peças com teor de umidade no estado de equilíbrio, foram submetidas ao processo de torneamento cilíndrico a fim de assumirem uma seção transversal com diâmetro de 38,0 mm conforme ilustrado na Figura 4.8. O equipamento utilizado neste processo foi um torno tubular (Figura 4.9) equipado com cabeçote porta-ferramentas (Figura 4.10) e o jogo de ferramentas de corte com pastilhas de metal duro soldadas, mostrado na Figura 4.11.

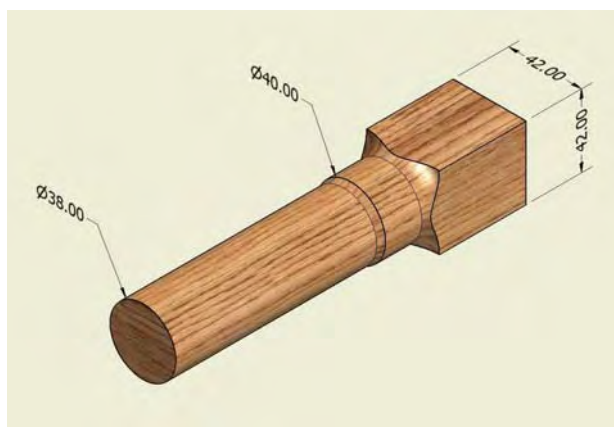


Figura 4.8 - Representação gráfica de um corpo-de-prova submetido ao torneamento tubular



Figura 4.9 - Vista geral da máquina de torneamento cilíndrico.

Especificação da máquina “Torno Tubular”:

- Marca Águia, modelo TTE 5400;
- Alimentação manual e sistema de avanço automático;
- Velocidades de avanço ajustadas em 10; 14 ou 18 m/min;
- Motorização de avanço: 1,5 CV, 1720 rpm;
- Motorização do cabeçote: 10,0 CV, 3520 rpm;
- Velocidade de corte para diâmetro de 38 mm de = 590 m/min (9,85 m/s)
- Cabeçote rotativo para 4 ferramentas (2 de desbaste e 2 de acabamento);
- Rotação do cabeçote porta ferramentas = 4950 rpm;
- Avanço por dente “fz”:
 - Para velocidade de avanço 10m/min = 1,01mm/rotação
 - Para velocidade de avanço 14m/min = 1,41mm/rotação
 - Para velocidade de avanço 18m/min = 1,82mm/rotação
- Jogo de roldanas de tracionamento (2 estriadas de entrada, 2 lisas de saída);
- Guia de alimentação em “V”;



Figura 4.10 - Porta ferramentas e sistema de fixação com detalhe da marcação para posicionamento das facas de desbaste e de acabamento.



Figura 4.11 – Jogo de ferramentas de desbaste e de acabamento, com pastilha soldada de metal duro.

As ferramentas de corte, constam de um jogo de 4 facas, confeccionadas em aço carbono, com inserto soldado de metal duro classe K. Cada jogo possui 2 facas de desbaste e 2 facas de acabamento, posicionadas respectivamente na porção anterior e posterior do porta ferramentas, o qual é fixado no cabeçote rotativo da máquina.

As ferramentas e porta ferramentas foram preparadas com a seguinte geometria:

- Ângulo de posicionamento e fixação das facas no porta ferramentas com inclinação de 20° em relação ao eixo da máquina;
- Ângulo de cunha = 52° ;
- Ângulo de saída = 0° ;
- Ângulo de folga = 38° ;

- Largura das facas = 38 mm;
- Espessura das facas = 5,8 mm;
- Espessura da pastilha de metal duro = 2,8 mm.

Após a preparação das amostras usinadas em torno tubular, foram selecionadas peças de 1,50 m de comprimento para cada velocidade de avanço de usinagem adotada (3), jogos de lixa aplicados (4) e espécie de madeira (2), totalizando 24 amostras.

4.2 Ensaio de lixamento

4.2.1 Máquina de ensaio

A máquina empregada nos ensaios foi uma Lixadeira Dupla de Cinta Vertical (Figura 4.12), para lixamento de peças cilíndricas de madeira com lixas de diferentes granulometrias para desbaste e acabamento, com a seguinte especificação técnica:

- Marca Águia, modelo LPD 3200;
- Alimentação manual das peças;
- Avanço automático com velocidade de alimentação de 10 a 20 m/min;
- Motorização de avanço: 1,0 CV, 1130 rpm;
- Motorização do cabeçote: 7,5 CV, 1740 rpm;
- 2 cabeçotes rotativo porta lixas de fita (1 de desbaste e 1 de acabamento);
- Velocidade tangencial das lixas = 21 m/s
- Tracionamento: 2 cabeçotes rotativos de esteira em borracha estriada;
- 2 Volantes tensores para atuação das lixas sobre a peça.



Figura 4.12 - Lixadeira Dupla de Cinta Vertical utilizada nos ensaios.

4.2.2 Operação de lixamento

As ferramentas de usinagem empregadas nesta operação constam de lixas abrasivas de óxido de alumínio zirconado de grãos 80, 100 e 120, com costado de pano e emendada industrialmente, as quais são posicionadas na forma de cinta sobre polias planas (superior e inferior) tencionadas mecanicamente por fusos de rosca quadrada (esticadores). Uma terceira polia (intermediária) é utilizada para pressionar a lixa sobre a peça cilíndrica de madeira, como ilustrado na Figura 4.13. Essa pressão deve ser suficiente para que a lixa comece atuar concomitantemente ao avanço da peça, impedindo assim, marcas de queimadura na madeira.

As Figuras 14a e 14b, apresentam em detalhes: o sistema de tracionamento por esteira de borracha, o corpo-de-prova posicionado, as polias de fixação da primeira lixa (desbaste) e polia intermediária.

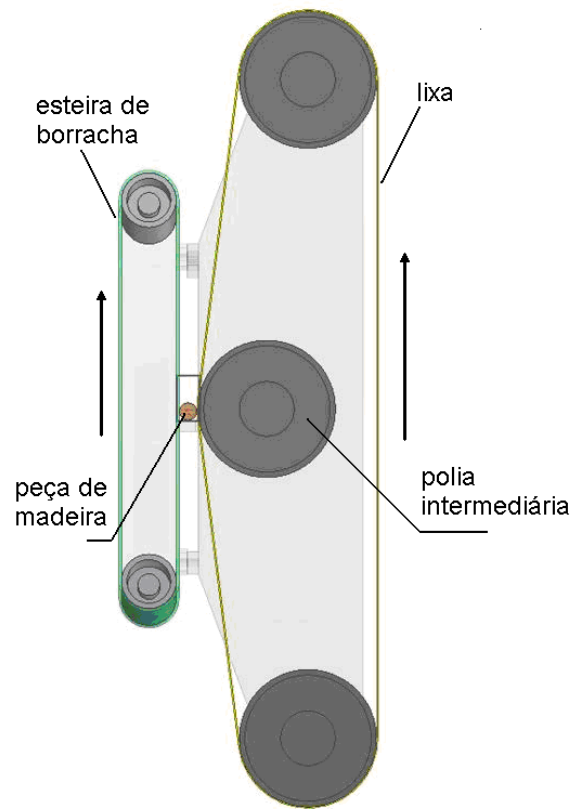


Figura 4.13 – Ilustração detalhada do funcionamento da lixadeira

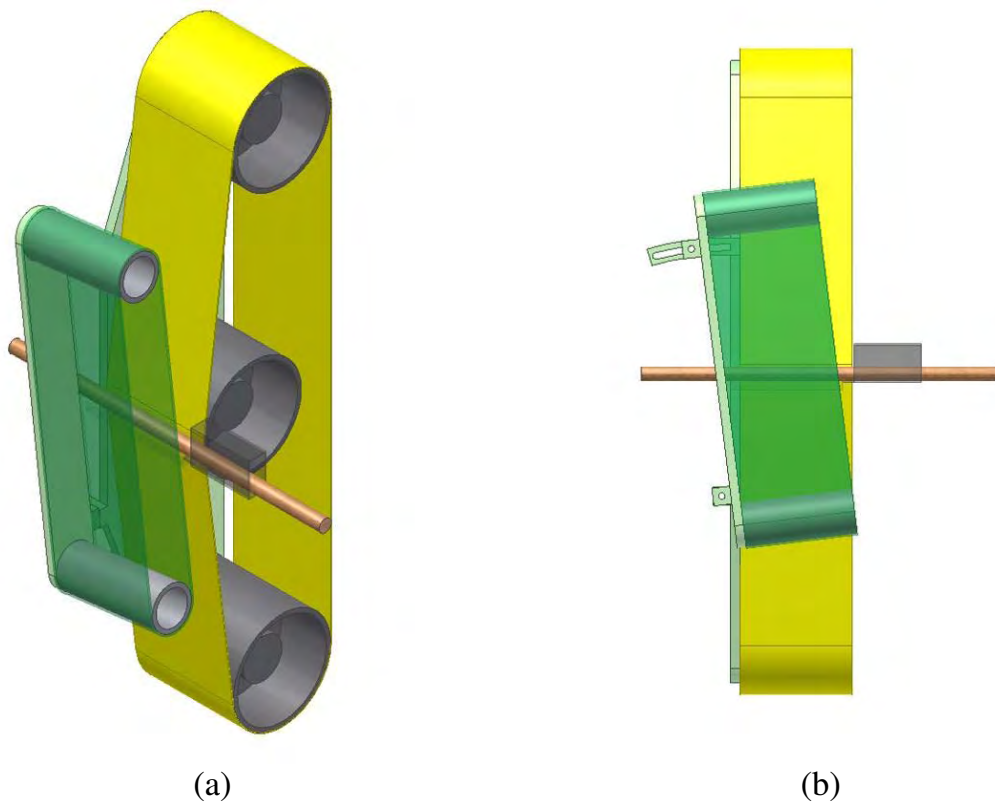


Figura 4.14 – Perspectiva isométrica (a) e vista lateral (b) do conjunto.

As dimensões das lixas empregadas nos ensaios foram de 3100 mm de comprimento e 200 mm de largura. Os parâmetros de usinagem adotados para os ensaios foram os normalmente empregados na indústria, considerando-se o emprego da velocidade de avanço que proporcionasse o melhor acabamento superficial à peça, quais sejam: velocidade de avanço (V_f) de 10 m/min; jogos de lixas: para cada série de ensaios foi adotado um jogo específico de lixas, conforme Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Jogos de lixas e suas respectivas granulometrias

Jogos de lixa	Desbaste	Acabamento
80-100	80	100
80-120	80	120
100-120	100	120
U80-120	80	120

O jogo de lixa “U80-120” refere-se ao jogo de lixas previamente usadas, de granulometria 80-120 que corresponde ao conjunto de lixas para desbaste e acabamento, empregadas durante os ensaios preliminares de ajuste da máquina de lixamento para a fixação da velocidade de avanço no lixamento, definição das tensões de esticamento das lixas e definição da pressão de compressão das correias responsáveis pelo giro e tracionamento das amostras. Este jogo de lixa foi utilizado antes dos ensaios de preparação de amostras, para o lixamento de aproximadamente 130 amostras da espécie *Eucalyptus grandis* com 38 mm de diâmetro e 1,50 m de comprimento, qual seja, aproximadamente 0,5 m³ de madeira serrada no estado bruto.

O ensaio de lixamento neste equipamento ocorreu da seguinte forma: a peça de madeira, na forma cilíndrica, foi posicionada em uma guia metálica e tracionada pelo cabeçote do sistema de avanço, o qual consta de duas correias de cintas rotativas de borracha, cuja inclinação define a velocidade de avanço das peças e, ao mesmo tempo, a rotação das correias proporciona o giro da peça em sentido contrário ao realizado pelas lixas.

4.3 Medição do acabamento superficial

4.3.1 Instrumento de medição (Rugosímetro)

Para medição da rugosidade superficial das peças de madeira empregou-se um rugosímetro marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 3+, de haste de medição com ponta apalpadora cone-esférica de diamante, raio de ponta de $2\ \mu\text{m}$ (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Instrumento de medição da rugosidade, empregado para medição do acabamento superficial das amostras.

4.3.2 Procedimentos de medição da rugosidade

As amostras de madeira, após usinadas no processo de lixamento para cada condição de ensaio preestabelecida, foram submetidas às medições de rugosidade das superfícies. O parâmetro de rugosidade adotado foi “ R_a ”, por melhor se ajustar aos estudos de acabamento superficial de madeiras, conforme constatado na revisão da literatura.

O comprimento de amostragem adotado foi de 2,5 mm (cut-off - λ_c), segundo valor sugerido pela ABNT 6405/1988, de acordo com o R_a esperado, indicado para uma faixa de rugosidade entre $2,0 < R_a \leq 10,0\ \mu\text{m}$. O percurso de medição (l_m) para cut-off 2,5 mm é de 12,5 mm, resultando na média de 5 valores adquiridos por medição.

Considerando a necessidade de investigar a influência dos parâmetros de usinagem (velocidades de avanço no torneamento e granulometrias das lixas) sobre o

acabamento superficial das amostras sem interferência de outros fatores, conforme norma NBR ISO 4288/2008, optou-se pela adoção de 6 medições por amostra, aceitando os resultados medidos desde que não mais do que um dos seis valores exceda o valor especificado, qual seja, $2,0 < R_a \leq 10,0 \mu\text{m}$.

4.3.3 Apresentação dos resultados

Os registros dos resultados da rugosidade foram anotados em tabelas para geração de planilhas eletrônicas Excel[®]. A partir dessas planilhas, onde se obteve as médias da rugosidade para cada corpo de prova, foram gerados os gráficos para cada tipo de análise comparativa, quais sejam: “Ra” das 6 medições por jogos de lixas; “Ra” médio por velocidades de avanço no torneamento e “Ra” médio por jogos de lixas.

Da análise “Ra” médio por velocidades de avanço no torneamento, foram gerados gráficos comparativos de “Ra” médio por espécie de madeira para cada jogo de lixas.

Após cada medição de “Ra” a região medida foi demarcada e posteriormente fotografada. As imagens das amostras foram obtidas por meio de um microscópio da marca Nikon, modelo EPIPHOT 200, equipado com objetivas de aumento de 20, 40, 60 e 80 vezes, juntamente com o programa de registro e armazenamento de imagens SPOT. Tais imagens foram registradas com o objetivo de auxiliar na análise dos resultados, quando da ocorrência de variações de grande amplitude comparada com as demais medições na mesma amostra. As imagens registradas das 24 amostras são apresentadas em Apêndice A.

4.3.4 Análise estatística dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios foram submetidos a Análise de Variância (Anova), adotando-se o método de fator duplo com repetição, por se tratar de dados

classificados com base em duas dimensões diferentes, neste caso: velocidades de avanço de usinagem e jogos de lixas.

As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os valores obtidos na análise estatística para as espécies ensaiadas de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*. Na sequência das referidas tabelas, são apresentadas as discussões sobre os resultados das mesmas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio da espécie *Eucalyptus grandis*

A Tabela 5.1 apresenta as medições de rugosidade “Ra” das amostras de *Eucalyptus grandis*, a média aritmética e o desvio padrão para cada corpo-de-prova.

Tabela 5.1 - Medidas de Rugosidade Ra (μm) - Amostras: *Eucalyptus grandis*

Velocidades de Avanço	Jogos de Lixas, Granulometrias: Desbaste-Acabamento			
	80-100	80-120	100-120	U 80-120
Vf=10m/min.	7,74	5,12	6,24	4,50
	7,41	4,94	5,46	4,34
	7,26	5,30	6,36	4,56
	7,60	5,70	6,36	4,58
	7,54	5,66	5,84	5,44
	6,70	5,78	5,48	5,26
	Média	7,38	5,42	5,96
	Desvio Padrão	0,369	0,347	0,423
Vf=14m/min.	7,20	5,96	5,68	5,84
	8,08	5,94	6,04	5,68
	7,22	6,34	6,18	6,03
	7,62	5,56	5,12	5,98
	7,48	5,10	5,56	6,32
	8,54	5,96	5,40	6,62
	Média	7,69	5,81	5,66
	Desvio Padrão	0,526	0,426	0,396
Vf=18m/min.	8,38	5,94	6,44	6,74
	8,63	6,76	6,54	7,18
	8,68	6,06	5,64	5,66
	8,15	5,68	5,78	6,41
	7,72	6,02	6,02	6,52
	7,50	6,70	5,56	5,90
	Média	8,18	6,19	6,00
	Desvio Padrão	0,483	0,437	0,414

A Figura 5.1 apresenta os valores médios das 6 medições de “Ra” em amostras de *Eucalyptus grandis*, para cada conjunto de lixas e velocidades de avanço testadas.

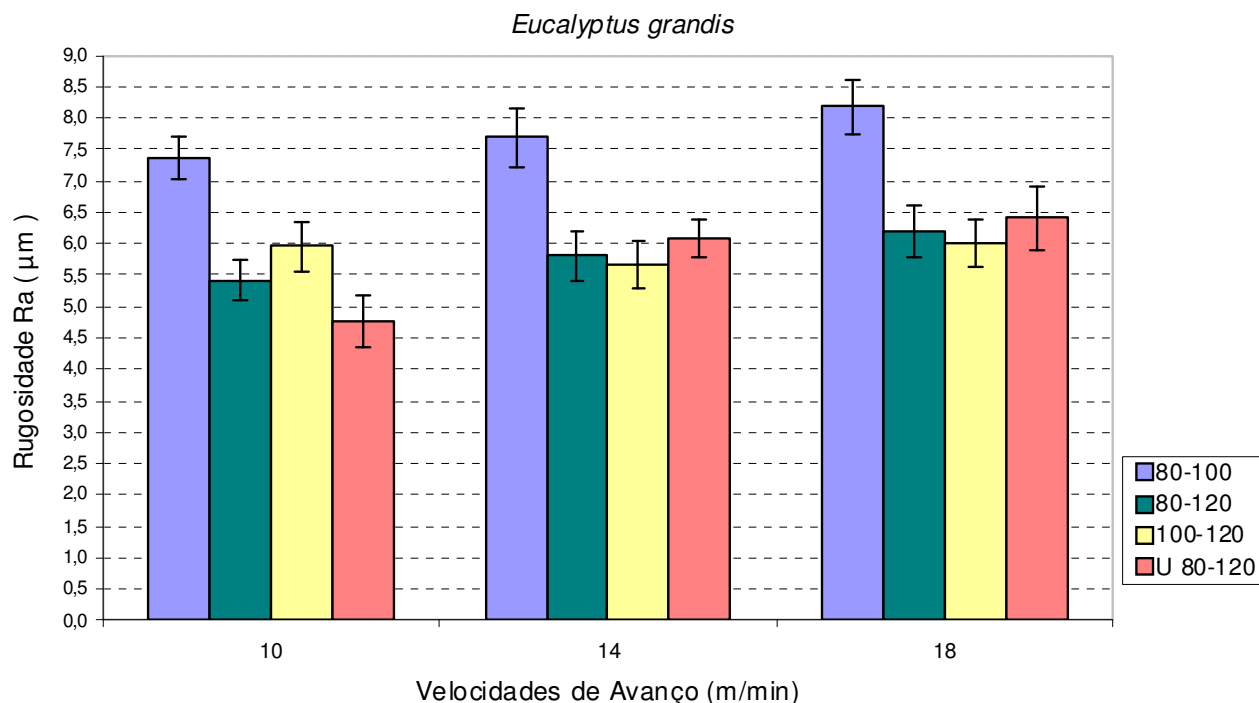


Figura 5.1 – Rugosidades “Ra” médias com ilustração do desvio padrão para cada conjunto de lixas e velocidades de avanço.

Como pode ser observado na Tabela 5.1, nenhum valor médio de “Ra” excedeu o intervalo especificado, sendo este entre 2,0 e 10,0 μm, para o comprimento de amostragem adotado (cut-off = 2,5 mm). Portanto, segundo a NBR ISO 4288/2008, o número de 6 medições adotado, garantiu a confiabilidade da medição da rugosidade de uma mesma superfície.

Observando-se o gráfico da Figura 5.1, mostra ser evidente que o uso do conjunto de lixas com lixa de acabamento de granulometria 100 (80-100), resultou num valor da rugosidade bem superior em relação aos demais conjuntos com lixas de acabamento de granulometria 120, para as três velocidades de avanço do torneamento empregadas; em média 37% para “ V_f ” = 10 m/min e 31% para “ V_f ” = 14 ou 18 m/min.

Da Figura 5.1, pode-se observar que o emprego do jogo de lixas U80-120 mostrou ser bem mais eficiente que os demais conjuntos para a menor velocidade de avanço de torneamento testada, muito provavelmente dado à capacidade de remoção das ondulações geradas na superfície da madeira por esta velocidade, qual seja, 10

m/min. Para as velocidades 14 e 18 m/min, os conjuntos com lixa de acabamento 120 apresentaram o mesmo comportamento, com menor “Ra” para o conjunto 100-120, “Ra” intermediário para o conjunto 80-120 e maior “Ra” para o conjunto U80-120.

A Figura 5.2 apresenta a influência da lixa de acabamento sobre a rugosidade em amostras de *Eucalyptus grandis*, fixando-se a lixa de granulometria 80 como sendo a lixa de desbaste.

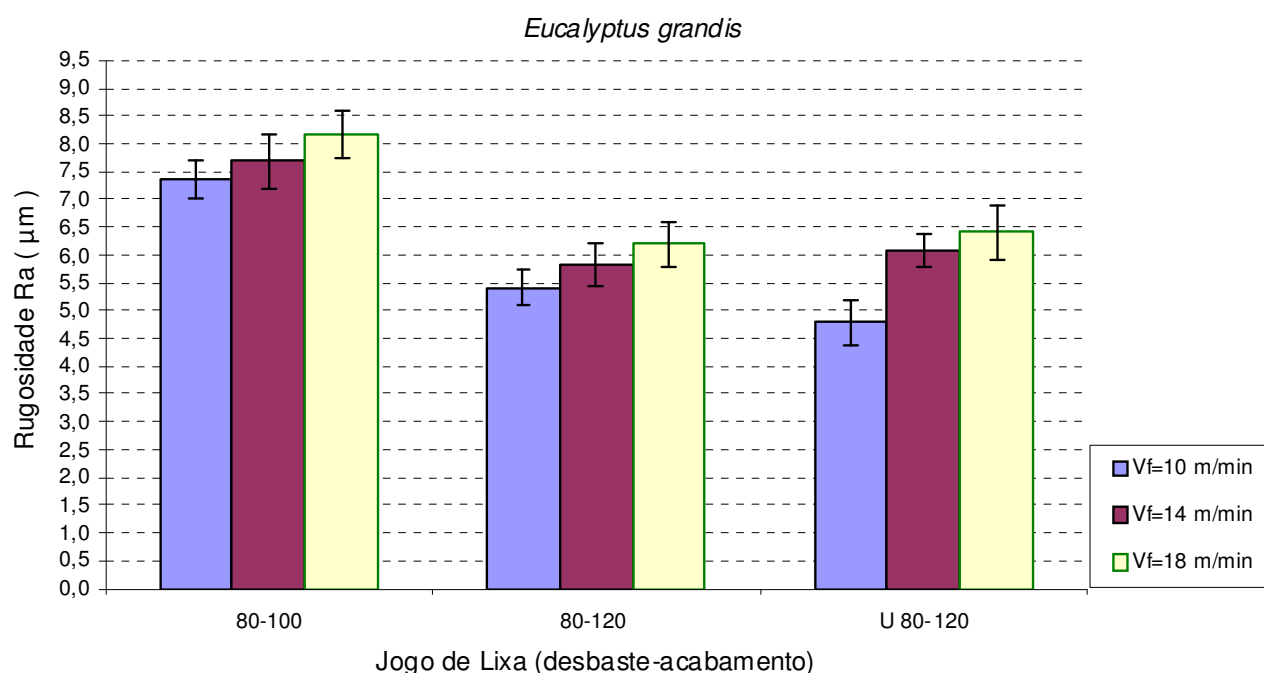


Figura 5.2 – Rugosidades “Ra” médias com ilustração do desvio padrão para diferentes conjuntos de lixas e velocidades de avanço.

Da Figura 5.2, pode-se observar que no emprego dos jogos de lixas com lixa de desbaste de granulometria 80, para todos os conjuntos, a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento, ou seja, quanto melhor o acabamento superficial da amostra a ser lixada (menor velocidade de avanço no torneamento), menor foi o valor de “Ra” medido. Entre os jogos de granulometrias 80-120, o jogo de lixas U80-120 resultou em maiores valores de “Ra” para velocidades de 14 e de 18 m/min.

A Figura 5.3 apresenta a influência da lixa de desbaste sobre a rugosidade em amostras de *Eucalyptus grandis*, fixando-se a lixa de granulometria 120 como sendo a lixa de acabamento.

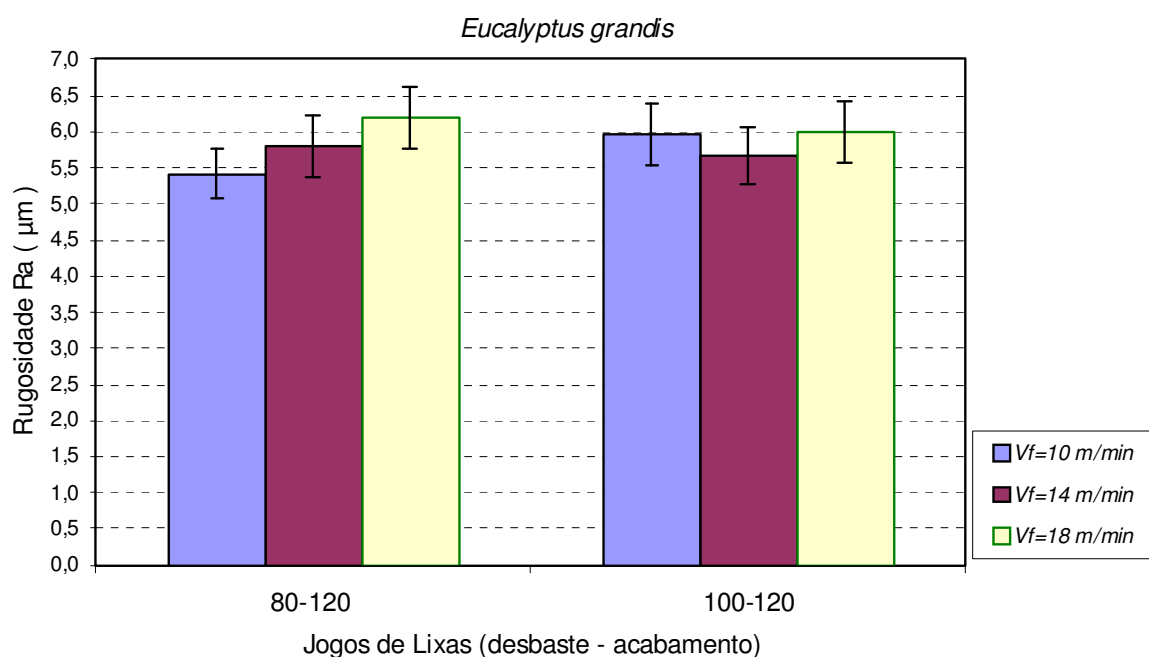


Figura 5.3 – Rugosidades “Ra” médias com ilustração do desvio padrão para diferentes conjuntos de lixas e velocidades de avanço.

Da Figura 5.3, pode-se observar que no emprego dos jogos de lixas com lixa de acabamento de granulometria 120, a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento somente para o conjunto 80-120, ou seja, neste caso quanto menor a velocidade de avanço no torneamento, menor foi o valor de “Ra” medido. Para o conjunto de granulometrias 100-120, o valor de “Ra” para velocidade de avanço de 10 m/min não resultou na mesma tendência, apresentando um menor valor de Ra na velocidade de avanço de 14 m/min. e rugosidades aproximadamente iguais para as velocidades de 10 e 18 m/min.

5.2 Ensaio da espécie *Eucalyptus citriodora*

A Tabela 5.2 apresenta as medições de rugosidade “Ra” das amostras de *Eucalyptus citriodora*, a média aritmética e o desvio padrão para cada corpo-de-prova.

Tabela 5.2 - Medidas de Rugosidade Ra (μm) - Amostras: *Eucalyptus citriodora*

Velocidades de Avanço	Jogos de Lixas, Granulometrias: Desbaste-Acabamento			
	80-100	80-120	100-120	U 80-120
Vf=10m/min.	7,62	4,42	4,64	5,96
	8,50	4,44	5,22	5,56
	8,42	5,14	5,44	5,58
	7,76	5,72	5,40	5,78
	8,20	4,64	4,98	5,44
	8,03	5,44	5,30	5,66
Média	8,09	4,97	5,16	5,66
Desvio Padrão	0,353	0,549	0,304	0,184
Vf=14m/min.	8,92	4,50	5,24	6,24
	8,42	5,08	5,70	5,92
	7,28	6,08	7,74	6,68
	8,90	6,40	6,00	5,90
	8,18	5,26	6,21	6,00
	8,22	4,50	6,28	5,78
Média	8,32	5,30	6,20	6,09
Desvio Padrão	0,603	0,794	0,847	0,329
Vf=18m/min.	8,26	6,24	6,90	5,90
	8,70	7,04	6,24	6,58
	8,64	4,78	6,57	5,68
	9,78	5,20	6,58	5,76
	8,98	7,22	7,02	5,81
	9,44	5,50	6,02	5,76
Média	8,97	6,00	6,56	5,92
Desvio Padrão	0,559	1,001	0,380	0,334

A Figura 5.4 apresenta os valores médios das 6 medições de “Ra” em amostras de *Eucalyptus citriodora*, para cada conjunto de lixas e velocidades de avanço testadas.

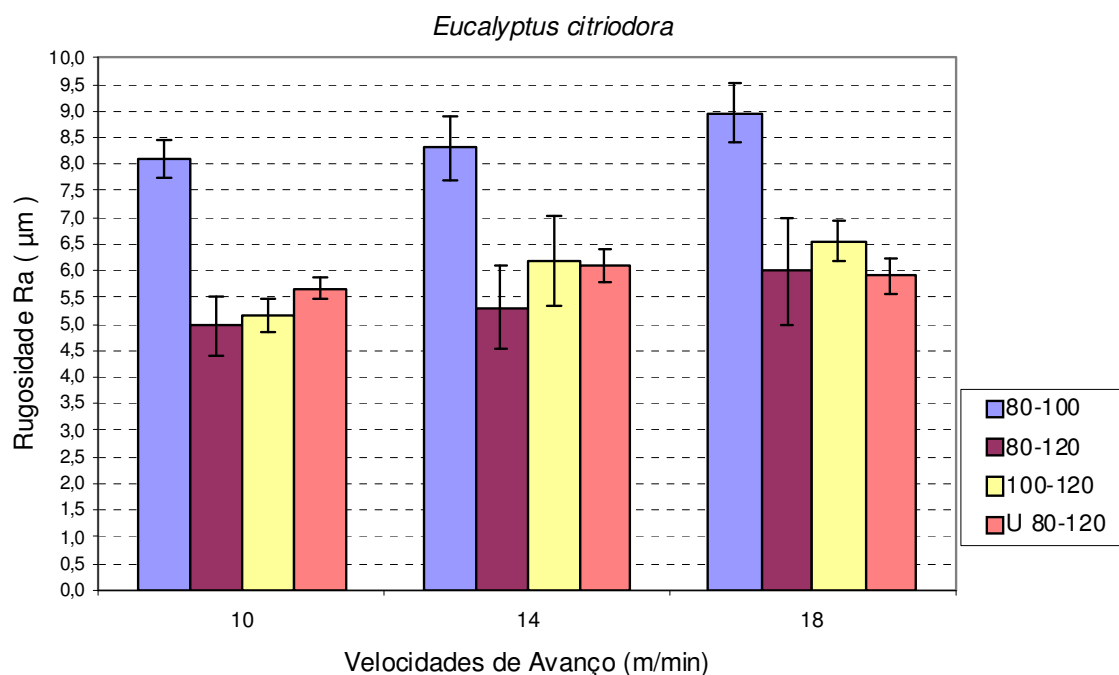


Figura 5.4 – Rugosidades “Ra” médias com ilustração do desvio padrão para cada conjunto de lixas e velocidades de avanço.

Como pode ser observado na Tabela 5.2, nenhum valor médio de “Ra” excedeu o intervalo especificado, sendo este entre 2,0 e 10,0 μm, para o comprimento de amostragem adotado (cut-off = 2,5 mm). Portanto, segundo a NBR ISO 4288/2008, o número de 6 medições adotado, garantiu a confiabilidade da medição da rugosidade de uma mesma superfície.

Observando os gráficos da Figura 5.4, mostra ser evidente que o uso do conjunto com lixa de acabamento de granulometria 100 (80-100), resultou num valor da rugosidade bem superior em relação aos demais conjuntos com lixas de acabamento de granulometria 120, para as três velocidades de avanço de torneamento empregadas; em média 54% para “ V_f ” = 10 m/min, 42% para “ V_f ” = 14 m/min e 46% para “ V_f ” = 18 m/min.

Da Figura 5.4, pode-se observar que o emprego do jogo de lixas U80-120 mostrou ser eficiente, assim como o mesmo conjunto empregando-se lixas novas somente para a maior velocidade de avanço de torneamento testada (18 m/min). Para a velocidade de avanço de torneamento de 10 m/min, dos conjuntos com lixa de

acabamento 120 variando-se as lixas de desbaste, os resultados mostram menor “Ra” para a lixa 80, “Ra” intermediário para lixa 100 e maior “Ra” para a lixa U80.

A Figura 5.5 apresenta a influência da lixa de acabamento sobre a rugosidade em amostras de *Eucalyptus citriodora*, fixando-se a lixa de granulometria 80 como sendo a lixa de desbaste.

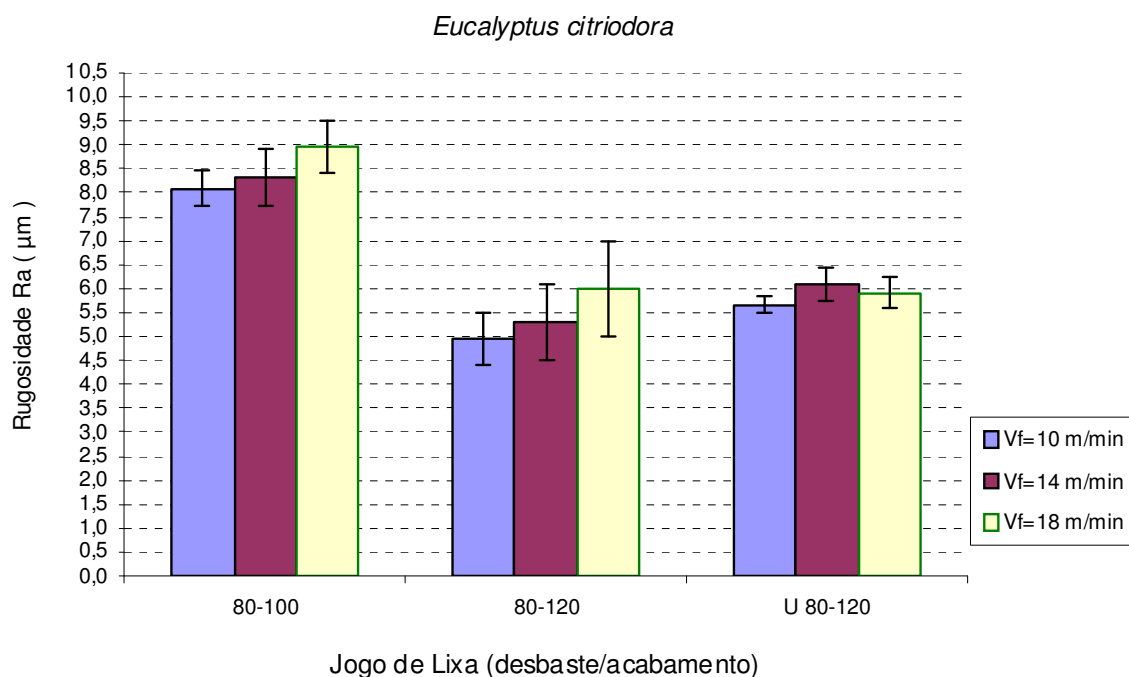


Figura 5.5 – Rugosidades “Ra” médias com ilustração do desvio padrão para diferentes conjuntos de lixas e velocidades de avanço.

Da Figura 5.5, pode-se observar que no emprego dos jogos de lixas com lixa de desbaste de granulometria 80, para todos os conjuntos, exceto em um valor (U80-120 e $V_f = 18$ m/min), a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento, ou seja, quanto melhor o acabamento superficial da amostra a ser lixada (menor avanço), menor foi o valor de “Ra” medido. Entre os jogos de granulometrias 80-120, o jogo de lixas U80-120 resultou em maiores valores de “Ra” para velocidades de 10 e de 14 m/min.

A Figura 5.6 apresenta a influência da lixa de desbaste sobre a rugosidade em amostras de *Eucalyptus citriodora*, fixando-se a lixa de granulometria 120 como sendo a lixa de acabamento.

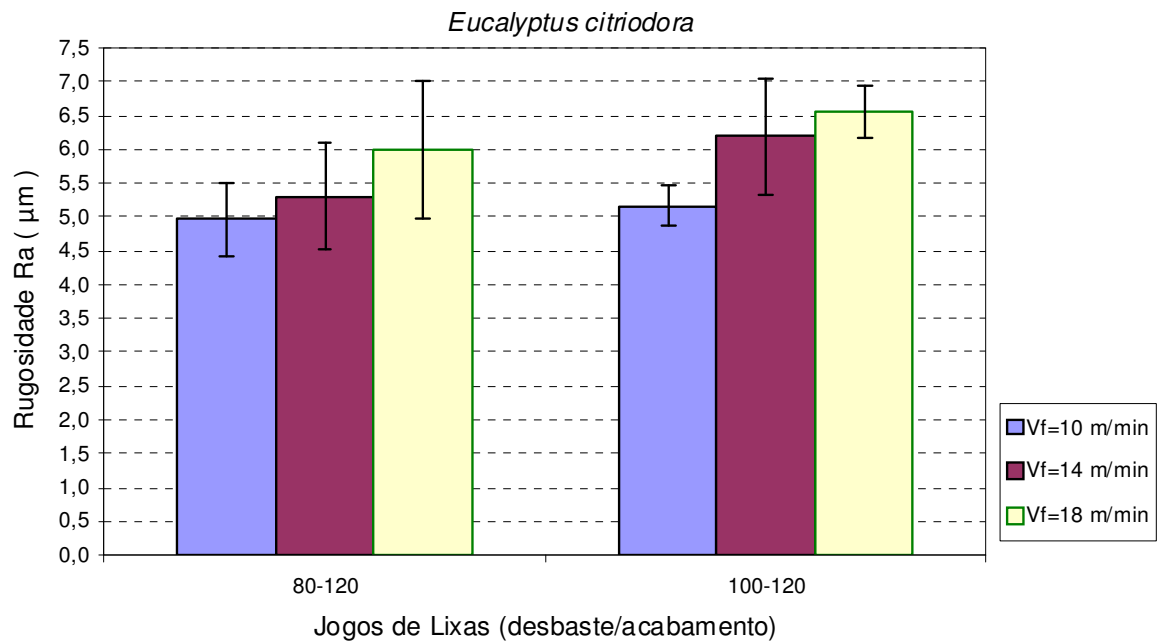


Figura 5.6 – Rugosidades “Ra” médias com ilustração do desvio padrão para diferentes conjuntos de lixas e velocidades de avanço.

Da Figura 5.6, pode-se observar que no emprego dos jogos de lixas com lixa de acabamento de granulometria 120, para os dois conjuntos de lixa, a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento, ou seja, neste caso quanto menor a velocidade de avanço no torneamento, menor foi o valor de “Ra” medido e portanto melhor o acabamento superficial.

5.3 Comparação dos resultados entre as espécies de eucalipto

A Tabela 5.3 apresenta os valores médios de “Ra” e o desvio padrão para as duas espécies de madeira ensaiadas e parâmetros de usinagem preestabelecidos.

Tabela 5.3 – Valores médios de “Ra” em μm e desvio padrão para as duas espécies de madeira.

Vf (m/min.)	Jg. Lixa	E. Grandis		E. Citriodora	
		Ra (μm)	DP	Ra (μm)	DP
10	80-100	7,38	0,369	8,09	0,353
10	80-120	5,42	0,347	4,97	0,549
10	100-120	5,96	0,423	5,16	0,304
10	U80-120	4,78	0,453	5,66	0,184
14	80-100	7,69	0,526	8,32	0,603
14	80-120	5,81	0,426	5,30	0,794
14	100-120	5,66	0,396	6,20	0,847
14	U80-120	6,08	0,340	6,09	0,329
18	80-100	8,18	0,483	8,97	0,559
18	80-120	6,19	0,437	6,00	1,001
18	100-120	6,00	0,414	6,56	0,380
18	U80-120	6,40	0,554	5,92	0,334

A Figura 5.7 apresenta em forma de gráficos, a relação entre a rugosidade média “Ra” e as velocidades de avanço adotadas no torneamento das amostras. Cada gráfico representa a ocorrência para esta relação empregando-se um conjunto específico de lixas, possibilitando uma melhor visualização para comparação entre as duas espécies de eucalipto ensaiadas.

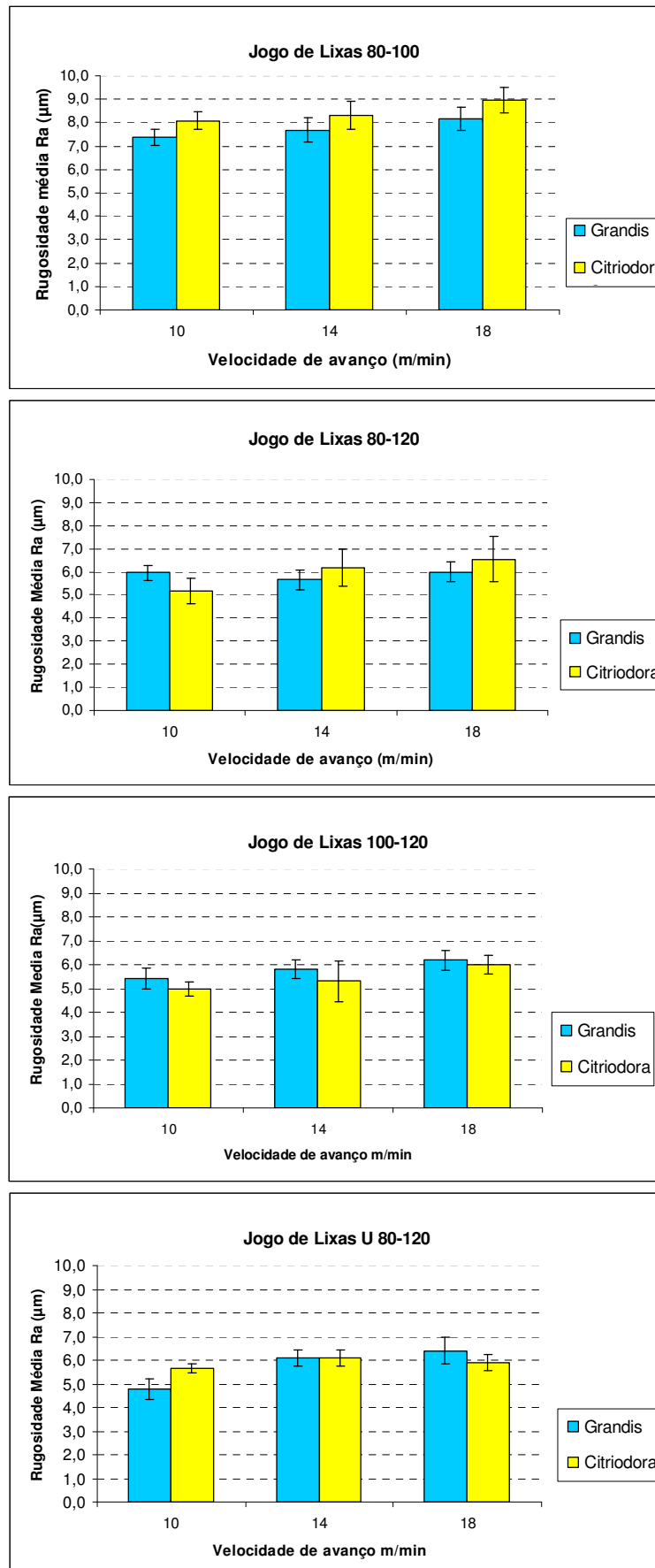


Figura 5.7 – Rugosidades “Ra” médias em μm com ilustração do desvio padrão, para as três velocidades de avanço do torneamento, duas espécies e diferentes conjuntos de lixas.

Da comparação entre as espécies ensaiadas, conforme apresentado na Figura 5.7, destacam-se as seguintes ocorrências:

Para o conjunto de lixas de menor granulometria (80-100), onde normalmente se espera um acabamento mais grosseiro da superfície, os valores médios da rugosidade “Ra” foram aproximadamente 9,2% inferiores para o *Eucalyptus grandis* nas três situações da velocidade de avanço de torneamento. Para o conjunto de lixas de maior granulometria (100-120), onde se espera um melhor acabamento da superfície, os valores de “Ra” foram aproximadamente 9,4% inferiores para o *Eucalyptus grandis* somente para os dois maiores valores de velocidade de avanço (14 e 18 m/min.). Com $V_f=10\text{m/min.}$, ocorreu uma inversão entre os valores de “Ra” para as duas espécies, registrando um “Ra” de aproximadamente 15% inferior para o *Eucalyptus citriodora*.

Comparando-se o jogo de lixa 80-100 com o jogo 100-120 pode-se constatar uma redução, respectivamente, da média dos três “Ra” de aproximadamente 42% para o *Eucalyptus citriodora* e de 32% para o *Eucalyptus grandis*.

Comparando-se os jogos de lixas de mesma granulometria (80-120), novas e usadas, em geral observa-se um melhor desempenho desses jogos de lixas para a espécie *Eucalyptus citriodora* ocorrendo uma diferença média de “Ra” de somente 7% para as lixas novas. Quanto ao desempenho entre as lixas novas e usadas para as duas espécies não se observou uma variação de “Ra” médio significativa.

Comparando-se o jogo de lixas 80-100 com o 80-120, pode-se verificar a influência da granulometria da lixa de acabamento onde os resultados mostraram claramente uma redução média de “Ra” para as três velocidades de aproximadamente 34% para o *Eucalyptus grandis* e de 56% para o *Eucalyptus citriodora*. Já, na comparação entre o jogo de lixas 100-120 com o 80-120, o desempenho deste último jogo foi igualmente melhor, porém com redução média de “Ra” de somente 1,2% para o *Eucalyptus grandis* e 10% para o *Eucalyptus citriodora*.

5.4 Análise estatística dos resultados

A Tabela 5.4 apresenta os resultados da análise estatística obtidos para a espécie *Eucalyptus grandis*.

Tabela 5.4 – Resultados estatísticos para a espécie *Eucalyptus grandis*.

Vel. Avanço	Jogo de lixa	80-100	80-120	100-120	U80-120	Total
10m/min	Contagem	6	6	6	6	24
	Soma	44,250	32,500	35,740	28,680	141,170
	Média	7,375	5,417	5,957	4,780	5,882
	Variância	0,136	0,120	0,179	0,205	1,095
	Desvio Padrão	0,369	0,347	0,423	0,453	1,047
14m/min	Contagem	6	6	6	6	24
	Soma	46,140	34,860	33,980	36,470	151,450
	Média	7,690	5,810	5,663	6,078	6,310
	Variância	0,277	0,182	0,157	0,116	0,844
	Desvio Padrão	0,526	0,426	0,396	0,340	0,919
18m/min	Contagem	6	6	6	6	24
	Soma	49,060	37,160	35,980	38,410	160,610
	Média	8,177	6,193	5,997	6,402	6,692
	Variância	0,233	0,191	0,171	0,307	0,984
	Desvio Padrão	0,483	0,437	0,414	0,554	0,992
Total	Contagem	18	18	18	18	
	Soma	139,45	104,52	105,70	103,56	
	Média	7,747222	5,806667	5,872222	5,753333	
	Variância	0,305327	0,251341	0,172477	0,704812	
	Desvio Padrão	0,553	0,501	0,415	0,840	

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Velocidade de Avanço	7,881911	2	3,940956	20,792	1,37968E-07	3,1504113
Lixas	50,75213	3	13,91738	89,25399	4,28373E-22	2,7580783
Interações	5,122844	6	0,853807	4,504583	0,000787975	2,254053
Dentro	11,37252	60	0,189542			
Total	75,1294	71				

SQ = Soma quadrática; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática

De acordo com a Análise de Variância no caso da espécie *Eucalyptus grandis*, ocorre uma interação significativa (valor $p=0,000788$) entre as variáveis: Jogos de lixas e Velocidades de avanço.

- O jogo de lixas U80-120 apresenta melhor resultado na velocidade de avanço de 10m/min.
- O jogo de lixas 100-120 apresenta melhor resultado na velocidade de avanço de 14m/min e todos os 4 jogos ensaiados tem pior comportamento na velocidade de avanço 18m/min.
- Analisando os jogos de lixas para cada velocidade de avanço, pode-se observar os seguintes resultados:
- Na velocidade de 10m/min, o jogo de lixas U80-120 apresenta resultado significativo.
- Nas velocidades de 14 e 18 m/min, o resultado do jogo de lixas 100-120 se destaca, porém não apresentando uma diferença estatística dos jogos de lixas 80-120 e U80-120.
- O jogo de lixas 80-100 apresenta valores maiores de rugosidade nas três velocidades estudadas.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados da análise estatística obtidos para a espécie *Eucalyptus citriodora*.

Tabela 5.5 – Resultados estatísticos para a espécie *Eucalyptus citriodora*.

Vel. Avanço	Jogo de lixa	80-100	80-120	100-120	U80-120	Total
10m/min	Contagem	6	6	6	6	24
	Soma	48,530	29,800	30,980	33,980	143,290
	Média	8,088	4,967	5,163	5,663	5,970
	Variância	0,124	0,301	0,092	0,034	1,747
	Desvio Padrão	0,353	0,549	0,304	0,184	1,322
14m/min	Contagem	6	6	6	6	24
	Soma	49,920	31,820	37,170	36,520	155,430
	Média	8,320	5,303	6,195	6,087	6,476
	Variância	0,364	0,630	0,718	0,108	1,701
	Desvio Padrão	0,603	0,794	0,847	0,329	1,304
18m/min	Contagem	6	6	6	6	24
	Soma	53,800	35,980	39,330	35,490	164,600
	Média	8,967	5,997	6,555	5,915	6,858
	Variância	0,313	1,001	0,144	0,111	1,951
	Desvio Padrão	0,559	1,001	0,380	0,334	1,397
Total	Contagem	18	18	18	18	
	Soma	152,250	97,600	107,480	105,990	
	Média	8,458	5,422	5,971	5,888	
	Variância	0,382	0,763	0,649	0,106	
	Desvio Padrão	0,618	0,873	0,806	0,326	

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Velocidade de Avanço	9,522008	2	4,761004	14,50018	7,29097E-06	3,1504113
Lixas	101,4054	3	33,8018	102,9472	1,25466E-23	2,7580783
Interações	3,079914	6	0,513319	1,563371	0,1736166	2,254053
Dentro	19,70047	60	0,328341			
Total	133,7078	71				

SQ = Soma quadrática; gl = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática

De acordo com a Análise de Variância no caso da espécie *Eucalyptus citriodora*, a interação não foi significativa ($p=0,1736$) podendo-se concluir que os jogos de lixas não interagem (de forma significativa) com as velocidades de avanço.

Sendo assim, analisando as variáveis em separado, pode-se concluir:

- Observando os resultados pela variação dos jogos de lixas, o menor valor de “Ra” (em média) ocorre no conjunto 80-120 que é significativamente inferior ao valor de “Ra” do conjunto 80-100, podendo-se observar também que ocorre um melhor resultado na combinação Jogo de lixas 80-120 x Velocidade 10m/min.
- Observando os resultados pela variação das velocidades de avanço, os resultados da velocidade 10m/min, apresentam melhor resultado que é significativamente inferior a velocidade 18m/min.
- O melhor valor de “Ra” é apresentado pela combinação Velocidade 10m/min x Jogo de lixas 80-120 seguido pela combinação Velocidade 10m/min x Jogo de lixas 100-120 tendo em vista que entre essas duas combinações não ocorre uma diferença estatisticamente significativa.

6. CONCLUSÕES

Da análise específica sobre o acabamento superficial da espécie de madeira *Eucalyptus grandis*, medindo-se a rugosidade “Ra” e seu valor médio para três diferentes avanços por dente nas superfícies das amostras (1,01; 1,41 e 1,82 mm/rot) em quatro situações de lixamento, empregando-se lixas de desbaste e de acabamento com diferentes granulometrias, pode-se concluir que:

- O uso do conjunto com lixa de acabamento de granulometria 100 (80-100), resultou num valor da rugosidade bem superior em relação aos demais conjuntos com lixas de acabamento de granulometria 120, para as três velocidades de avanço do torneamento empregadas.
- O emprego do jogo de lixas usadas, granulometrias 80 para desbaste e 120 para acabamento, mostrou ser bem mais eficiente que os demais conjuntos de lixas, para a menor velocidade de avanço de torneamento testada ($V_f = 10$ m/min)
- No emprego dos jogos com lixa de desbaste de granulometria 80, para todos os conjuntos, a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento, ou seja, quanto melhor o acabamento superficial da amostra a ser lixada (menor avanço), menor foi o valor de “Ra” medido.
- No emprego dos jogos com lixa de acabamento de granulometria 120, a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento somente para o conjunto 80-120, ou seja, quanto menor a velocidade de avanço de torneamento, menor foi o valor de “Ra” medido.

Da mesma forma, da análise específica sobre o acabamento superficial para a espécie de madeira *Eucalyptus citriodora*, pode-se concluir que:

- O uso do conjunto com lixa de acabamento de granulometria 100 (80-100), tal como para o *Eucalyptus grandis*, resultou num valor da rugosidade bem superior em relação aos demais conjuntos com lixas de acabamento de granulometria 120.
- O emprego do jogo de lixas usadas, de granulometria 80-120, mostrou ser tão eficiente como o mesmo conjunto quando empregando lixas novas, somente para a maior velocidade de avanço de torneamento testada (18 m/min).

- No emprego dos jogos com lixa de desbaste de granulometria 80, para todos os conjuntos, exceto em um valor (U_{80-120} e $V_f = 10$ m/min), a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento das amostras.
- No emprego dos jogos com lixa de acabamento de granulometria 120, para os dois conjuntos de lixa, a medida da rugosidade foi proporcional à velocidade de avanço de torneamento.

Da análise comparativa sobre o acabamento superficial obtido pela medição da rugosidade superficial das amostras das duas espécies de madeira ensaiadas, podemos concluir que:

- Em todos os ensaios realizados, nenhum valor médio de “Ra” medido excedeu o intervalo especificado entre 2,0 e 10,0 μm , para o comprimento de amostragem adotado (cut-off = 2,5 mm). Portanto, segundo a NBR ISO 4288/2008, o número de (6) seis medições adotado, garantiu a confiabilidade da medição da rugosidade de uma mesma superfície.
- Para o conjunto de lixas de menor granulometria (80-100), onde normalmente se espera um acabamento mais grosseiro da superfície, os valores da rugosidade “Ra” foram aproximadamente 9,2% inferiores para o *Eucalyptus grandis* nas três situações da velocidade de avanço de torneamento.
- Para o conjunto de lixas de maior granulometria (100-120), onde se espera um melhor acabamento da superfície, os valores de “Ra” foram aproximadamente 9,4% inferiores para o *Eucalyptus grandis* para os dois maiores valores de velocidade de avanço (14 e 18 m/min.).
- Comparando-se o jogo de lixa 80-100 com o jogo 100-120 pode-se constatar uma redução, respectivamente, da média dos três valores de “Ra” de aproximadamente 42% para o *Eucalyptus citriodora* e de 32% para o *Eucalyptus grandis*.
- Comparando-se os jogos de lixas de mesma granulometria (80-120), novas e usadas, em geral observa-se um melhor desempenho de ambos para a espécie *Eucalyptus citriodora*. Para o jogo de lixas usadas, observou-se uma

considerável influência da velocidade de avanço de torneamento sobre os valores de “Ra” medidos para as duas espécies.

- Comparando-se o jogo de lixa 80-100 com 80-120, pode-se verificar a influência da granulometria da lixa de acabamento, na qual os resultados mostraram uma redução média de “Ra” em aproximadamente 34% para o *Eucalyptus grandis* e de 56% para o *Eucalyptus citriodora*.
- Comparando-se o jogo de lixas 100-120 com o 80-120, o desempenho deste último jogo foi igualmente melhor, porém com redução média de “Ra” de somente 1,2% para o *Eucalyptus grandis* e 10% para o *Eucalyptus citriodora*.

De todos os aspectos conclusivos da análise e discussão dos resultados obtidos, pode-se afirmar que as seguintes situações se confirmaram:

- Para os três conjuntos de lixas novas empregadas nos experimentos, o conjunto de lixas de granulometrias 80 e 120, para desbaste e acabamento, respectivamente, foi aquele que apresentou o melhor desempenho, em elevados percentuais como apresentados, quanto ao acabamento superficial obtido nas amostras de madeira ensaiadas para as duas espécies, nas condições de usinagem aqui experimentadas.
- O emprego de lixas já utilizadas para o trabalho especificado, não demonstrou perda de desempenho significativa de rendimento, comparado aos resultados do mesmo conjunto de lixas em estado novo, bem como daquelas de diferentes granulometrias testadas.
- Numa razão proporcional, para o conjunto de lixas 80-120, a cada 4 m/min aumentado na velocidade de avanço de torneamento (0,4 mm no avanço por dente f_z) das amostras, aumenta-se o valor da rugosidade média “Ra” em 4%, qual seja, na condição ótima de lixamento para os parâmetros de usinagem aqui preestabelecidos, podemos confirmar que: nestas condições em média, a cada 0,1 mm/rot de aumento no avanço por dente, tem-se o aumento de 1% em “Ra”.
- De acordo com o estudo estatístico de análise de variância, constatou-se que para a espécie *Eucalyptus grandis* ocorreu uma interação significativa entre as variáveis: jogos de lixas e velocidade de avanço de torneamento, sendo que a mesma afirmação não se pode dar para análise estatística da espécie *Eucalyptus citriodora*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405**: rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, Set. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12179**: especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Calibração de instrumentos de medição por contato (com sapata de apalpação). Rio de Janeiro, Ago. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**. Rio de Janeiro, 1984.

ARENCIBIA. F. V. Aula: “Tolerâncias Geométricas”, **Primeiro Seminário de Metrologia**, Universidade Federal de Uberlândia, Mar, 2009.

BURDURLU, E. et al. The effect of the number of blades and the grain size of abrasives in planing and sanding on the surface roughness of European Black Pine and Lombardy Poplar. **Turkish journal of agriculture and forestry**. Ankara, Turquia, v.29, n. 4, p.315-321, 2005.

CARRANO, A. L.; TAYLOR, J. B.; LEMASTER, R. L. Parametric characterization of peripheral sanding. **Forest Products Journal**, v.52, n. 9, p. 44-50, Set., 2002.

CASTRO, E. M. **Estudo da usinabilidade de chapas MDF (medium density fiberboard) para operações de acabamento e desbaste**. 2000. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos/Área Interunidades – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CATAI, R. E. **Lixa, lixadeiras e formas de lixamento da madeira**. 2002. 72p. Trabalho apresentado como parte da disciplina “Usinagem da Madeira” no Curso de Pós Graduação em Engenharia Industrial – Faculdade de Engenharia de Bauru – Universidade Estadual Paulista, 2002.

COELHO, C. L. et al. Estudo dos efeitos dos parâmetros de maquinação da madeira nas características objectivas e percepção subjectiva de um acabamento. In: 5º CONGRESSO FLORESTAL NACIONAL, 05, 2005, Viseu, Instituto Politécnico Portugal.

COELHO, C. L. et al. Method for evaluating the influence of wood machining conditions on the objective characterization and subjective perception of a finished surface. **Journal of Wood Science & Technology**, v.42, n. 3, p.181-195, Mar., 2008.

CÔTÉ, W. **Wood as a substrate for coatings**. Journal of coating technology, v.55, n.699, 1983 apud COELHO, C.L. **Estudo dos efeitos de maquinação da madeira nas características objectivas e percepção subjectiva de um acabamento**. In: 5º CONGRESSO FLORESTAL NACIONAL, 2005, Viseu. **Anais...** Viseu, Portugal: Instituto Politécnico, Mai, 2005.

DE MOURA, L. F.; HERNANDEZ, R. E. Effects of abrasive mineral, grit size and feed speed on the quality of sanded surfaces of sugar maple wood. **Journal of Wood Science and Technology**. v.40, n. 6, p.517-530, Ago., 2006.

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

GONÇALVES, M.T.T., **Processamento da Madeira**, 1.ed. Bauru: Document Center Xerox – USC, 2000. 242p.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. The influence of wood anatomy on evaluating the roughness of sanded solid wood. **Journal of the Institute of Wood Science**, London, UK, v.17, n. 2, P.65-73, 2005.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Processing roughness of sanded wood surfaces. **European Journal of Wood and Wood Products**, Heidelberg, Berlin, v.63, n. 1, p. 43-52, Fev., 2005.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Filtering the roughness of a sanded wood surface. **European Journal of Wood and Wood Products**, Heidelberg, Berlin, v.64, n. 5, p. 363-371, Out., 2006.

HARUYAMA, S.; MURASE, Y.; YNAGAWA, K. Advancing sanding technology for wood and wood-based materials, 1: Experimental development of a flexible sanding device. **Journal of the Japan Wood Research Society**, Japan, v.48, n. 3, p.145-151, Mai., 2002.

HENDARTO, B. et al. Analysis of roughness of a sanded wood surface. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.28, n. 7-8, p.775-780, Abr., 2006.

HIZIROGLU, S. Evaluation of surface quality of particleboard. In: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUALITY, RELIABILITY, AND MAINTENANCE, QRM 2004, Oxford, United Kingdom, p.243-246, Apr. 2004.

HIZIROGLU, S.; KOSONKORN, P. Evaluation of surface roughness of Thai medium density fiberboard (MDF). **Building and environment**. v .41, n.4, p.527-533, 2006.

HIZIROGLU, S. Surface roughness analysis of wood composites: A stylus method. **Forest Product Journal**, v. 46, n. 7-8, p. 67-72, 1996.

HU, C.; AFZAL, M. T. Automatic measurement of wood surface roughness by laser imaging. **Forest Products Journal**, v.55, n. 12, p. 158-163, Dez., 2005.

KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York: Ronald Press Company, 1964. 530p.

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

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

LOPES, C. S. D.; NOLASCO, A. M.; GONÇALVES, M. T. T. Qualidade da superfície usinada de três espécies de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Instituto Brasileiro da Madeira e Estruturas de Madeira, 2008.

MALDONADO, M. R. Trabajabilidad de Tableros. **Maderas Cs. & Tec.**, v.1, n.1, p.61-70, 1998.

McKENZIE, W.M. Fundamental aspects of the Wood cutting process. **Forest Products Journal** v.12, n.6, p19-26, 1960.

McKENZIE, W. M. **Fundamental analysis of the wood cutting process**. Dept. Of Wood Technology School of Natural Resources, University of Michigan, Ann Arbor Ed., 1961 apud KOCH, P. **Wood machining processes**. New York: Ronal Press Company, 1964.

NOGUEIRA, M.C.J.A. **Indicações para o emprego de dezesseis espécies de eucalipto na construção civil**. 1991. 131 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

PETERS, C. C.; CUMMING, J. D. Measuring wood surface roughness: a review. **Forest Product Journal**, v.20, n.12, p40-42, 1970.

PORANKIEWICZ, B.; WIELOCH, G. Sanding of *fagus silvatica* L. wood perpendicularly to the grains. **BioResources**, North Carolina, USA, v.3, n.3, p.684-700, 2008.

SALONI, D. E.; LEMASTER, R. L.; JACKSON, S. D. Abrasive Machining Process Characterization on Material Removal Rate, Final Surface Texture, And Power Consumption for Wood. **Forest Products Journal**, Madison, USA, v.55, n. 12, p.35-52, Dez., 2005.

SIKLIENKA, M.; OCKAJOVA, A. Analysis of cutting forces during sanding of native wood. **Drevarsky Vyskum/Wood Research**, Eslováquia, v.48, n. 1-2, p.15-21, 2003.

SILVA, A. L. P. **Diretrizes de gestão e tecnologia para o tratamento de efluentes industriais**. 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de Pernambuco / Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SILVA, J. R. M. et al. A utilização de rugosímetro na qualificação das superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus SP*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Instituto Brasileiro da Madeira e Estruturas de Madeira, 2006.

SILVA, J. R. M. et al. Superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus spp* qualificadas por metrologia óptica - Laser Ne-He. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Instituto Brasileiro da Madeira e Estruturas de Madeira, 2006.

SINN, G.; et al. Changes in the surface properties of wood due to sanding. **Holzforschung**. v.58, n. 3, p. 246–251, Mai., 2004.

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.

TRIBOULOT, P.; et al. Planning of Norway Spruce with Very Varied Ring Width. **Olz Roh-Werks**. V. 49, p. 181-184, 1991.

WILLIAMS R.S. et al. **Finishes for exterior wood**: selection, application, and maintenance. Forest Product Society, Madison, WI. 1996 apud COELHO, C.L. **Estudo dos efeitos de maquinação da madeira nas características objectivas e percepção subjectiva de um acabamento**. In: 5º CONGRESSO FLORESTAL NACIONAL, 2005, Viseu. **Anais...** Viseu, Portugal: Instituto Politécnico, Mai, 2005.

ZAVARIN, E.; COOL L. G.; JONES S. J. Analysis of solid wood surfaces by internal reflection Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR-IRS). **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.11, n. 1, p. 41-56, Mar., 1991.

ZERIZER, A.; MANSSERI, A. Usinabilité et qualification des états de surface du chêne zeen algérien (*Quercus Canariensis Willd*). In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR IWMS, 14., 1999, Cluny, Epinal, **Anais...** Cluny, Epinal: v. 12, p.12-19, Set., 1999.

APÊNDICE A – Imagens das amostras.

Imagens ampliadas em 40 vezes das amostras de *Eucalyptus grandis*:

Usinadas com velocidade de avanço= **10m/min**



Jogo de lixas 80-100



Jogo de lixas 80-120



Jogo de lixas 100-120



Jogo de lixas 100-120 Usadas

Imagens ampliadas em 40 vezes das amostras de *Eucalyptus grandis*:

Usinadas com velocidade de avanço= **14m/min**



Jogo de lixas 80-100



Jogo de lixas 80-120



Jogo de lixas 100-120



Jogo de lixas 100-120 Usadas

Imagens ampliadas em 40 vezes das amostras de *Eucalyptus grandis*:

Usinadas com velocidade de avanço= **18m/min**



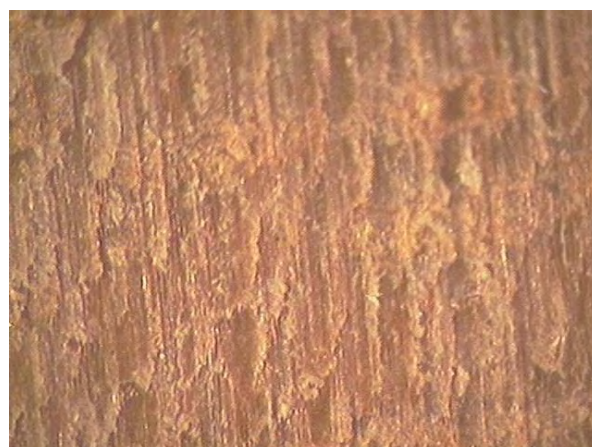
Jogo de lixas 80-100



Jogo de lixas 80-120



Jogo de lixas 100-120



Jogo de lixas 100-120 Usadas

Imagens ampliadas em 40 vezes das amostras de *Eucalyptus citriodora*:

Usinadas com velocidade de avanço= **10m/min**



Jogo de lixas 80-100



Jogo de lixas 80-120



Jogo de lixas 100-120



Jogo de lixas 100-120 Usadas

Imagens ampliadas em 40 vezes das amostras de *Eucalyptus citriodora*:

Usinadas com velocidade de avanço= **14m/min**



Jogo de lixas 80-100



Jogo de lixas 80-120



Jogo de lixas 100-120



Jogo de lixas 100-120 Usadas

Imagens ampliadas em 40 vezes das amostras de *Eucalyptus citriodora*:

Usinadas com velocidade de avanço= **18m/min**



Jogo de lixas 80-100



Jogo de lixas 80-120



Jogo de lixas 100-120



Jogo de lixas 100-120 Usadas

ANEXO A

Propriedades físicas e mecânicas das espécies *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis* segundo Nogueira (1991):

Os resultados apresentados em tabelas incluem os seguintes itens:

- A) Numero de repetições;
- B) Média dos valores numéricos das propriedades avaliadas;
- C) Desvio padrão dos valores numéricos das propriedades avaliadas;
- D) Valor característico, definido como o valor acima do qual se encontram 95% dos resultados experimentais obtidos. Para se determinar o valor característico foi assumida a hipótese de os resultados apresentarem distribuição normal (ou de Gauss), segundo o que recomenda ROCCO LAHR (1990).
- E) Intervalo de confiança da média a um nível de 95% de probabilidade.

DENSIDADE APARENTE (g/cm³)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	68	1,13	0,11	0,95	1,10;1,15
Grandis	114	0,98	0,14	0,76	0,96;1,01

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	72	1,00	0,13	0,80	0,97;1,04
Grandis	118	0,63	0,15	0,38	0,60;0,65

DENSIDADE BÁSICA (g/cm³)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	68	0,78	0,09	0,64	0,76;0,80
Grandis	114	0,61	0,11	0,33	0,49;0,53

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	68	0,78	0,10	0,63	0,76;0,80
Grandis	114	0,50	0,10	0,33	0,46;0,52

COMPRESSÃO PARALELA – MÓDULO DE RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	69	548	104	377	523;573
Grandis	109	335	76	409	321;349

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	67	621	148	376	584;657
Grandis	113	401	114	214	380;423

COMPRESSÃO PARALELA – MÓDULO DE ELASTICIDADE (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	69	181927	46545	105360	171000;193000
Grandis	109	125155	37254	63872	118000;132000

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	66	181145	59420	83399	167000;196000
Grandis	113	125967	36226	67376	120000;134000

COMPRESSÃO NORMAL – MÓDULO DE RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	67	51	34	*	43;60
Grandis	114	36	16	10	33;39

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	71	64	36	4	55;72
Grandis	112	44	17	16	41;48

COMPRESSÃO NORMAL – MÓDULO DE ELASTICIDADE (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	67	5127	3447	*	4286;5958
Grandis	114	3605	1610	957	3307;3904

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	71	6269	3338	778	5479;7060
Grandis	112	4432	1745	1562	4105;4759

TRAÇÃO PARALELA - RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	66	1142	442	415	1034;1251
Grandis	105	674	286	203	618;729

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	70	1236	395	586	1142;1331
Grandis	109	703	326	167	641;765

TRAÇÃO PARALELA – MÓDULO DE ELASTICIDADE (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	66	191987	56579	98915	178000;206000
Grandis	105	139220	46143	63315	130000;148000

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	70	218840	62938	115307	204000;234000
Grandis	108	145763	36634	85500	139000;153000

TRAÇÃO NORMAL – RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	60	37	13	16	34;40
Grandis	113	26	9	11	25;28

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	62	39	17	11	35;44
Grandis	104	30	11	11	28;32

FLEXÃO – MÓDULO DE RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	68	1096	238	705	1038;1154
Grandis	110	644	149	398	615;672

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	70	1245	292	765	1176;1315
Grandis	110	719	178	426	685;752

FLEXÃO – MÓDULO DE ELASTICIDADE (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	68	181455	41218	113651	171000;191000
Grandis	110	109781	30188	60122	104000;115000

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	70	193178	41218	109752	171000;191000
Grandis	110	120864	30188	75483	104000;115000

CISALHAMENTO – MÓDULO DE RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	70	149	35	92	141;157
Grandis	113	96	20	98	193;100

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	70	180	40	115	171;190
Grandis	113	116	28	70	111;121

FENDILHAMENTO – MÓDULO DE RESISTÊNCIA (daN/cm²)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	67	9,0	2,0	5,4	8,3;9,3
Grandis	113	6,6	1,7	3,8	5,3;6,0

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	69	9,7	10,2	*	7,2;12,1
Grandis	117	6,6	2,6	2,3	6,0;7,0

DUREZA NORMAL (daN)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	69	1133	760	*	950;1315
Grandis	111	455	140	224	429;482

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	71	1078	558	16	946;1210
Grandis	113	484	214	132	444;524

DUREZA PARALELA (daN)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	69	1005	344	439	922;1088
Grandis	111	403	175	115	370;436

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	71	990	300	496	919;1061
Grandis	113	407	185	102	372;441

TENACIDADE (daN.cm)

Teor de umidade: SATURADA (30%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	68	1,93	0,60	0,93	1,78;2,07
Grandis	110	1,07	0,52	0,22	0,97;1,17

Teor de umidade: SATURADA (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	66	2,13	0,54	1,24	2,00;2,26
Grandis	111	1,17	0,62	0,15	1,06;1,29

RETRAÇÃO RADIAL TOTAL (%)

Teor de umidade: VARIANDO DE 0% A 30%

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	61	7,40	1,48	4,36	7,02;7,77
Grandis	71	6,25	1,92	3,09	5,80;6,71

Teor de umidade: EQUILÍBRIO AO AR (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	55	7,31	1,51	4,83	6,91;7,72
Grandis	71	6,20	1,88	3,10	5,75;6,65

RETRAÇÃO TANGENCIAL TOTAL (%)

Teor de umidade: VARIANDO DE 0% A 30%

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	61	8,91	1,36	6,67	8,56;9,26
Grandis	71	9,16	1,89	6,05	8,71;9,60

Teor de umidade: EQUILÍBRIO AO AR (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	55	8,86	1,36	6,62	8,49;9,23
Grandis	71	9,15	1,84	6,13	8,71;9,58

RETRAÇÃO AXIAL TOTAL (%)

Teor de umidade: VARIANDO DE 0% A 30%

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	55	0,76	0,19	0,46	0,71;0,81
Grandis	71	0,87	0,30	0,37	0,80;0,94

Teor de umidade: EQUILÍBRIO AO AR (12%)

Espécie	N	Média	Desvio Padrão	Valor Característico	Intervalo de confiança
Citriodora	55	0,77	0,19	0,45	0,72;0,82
Grandis	71	0,87	0,27	0,23	0,81;0,94