UNESP
Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá

CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE, PRESSÃO E GRANULOMETRIA DE LIXA NO LIXAMENTO PLANO DO *Pinus elliottii*

Guaratinguetá
2011

LUIZ FERNANDO FREZZATTI SANTIAGO

CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE, PRESSÃO E GRANULOMETRIA DE LIXA NO LIXAMENTO PLANO DO *Pinus elliottii*

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais Lignocelulósicos.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Guaratinguetá
2011

Santiago, Luiz Fernando Frezzatti
S235c Caracterização da influência da velocidade de corte, pressão e granulometria de lixa no lixamento plano do *Pinus elliottii* / Luiz Fernando Frezzatti Santiago. – Guaratinguetá : [s.n.], 2011
125 f. : il.
Bibliografia: f. 111-117

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tiburcio Gonçalves

1. Usinagem 2. Rugosidade I. Título

CDU 621.9

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIZ FERNANDO FREZZATTI SANTIAGO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE 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. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador / Unesp-Itapeva

Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Unesp-Feg

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
Unesp-Bauru

Junho de 2011

DADOS CURRICULARES

LUIZ FERNANDO FREZZATTI SANTIAGO

NASCIMENTO	28.05.1983 – ITAPEVA / SP
FILIAÇÃO	Fernando Santiago Edna Frezzatti Santiago
2002/2003	Técnico em informática - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
2004/2009	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira - Universidade Estadual Paulista.
2009/2011	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

aos meus pais *Fernando e Edna*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos,

aos funcionários do *Campus* da UNESP de Itapeva de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade

- FAPESP - através do processo nº 2009/11302-2

SANTIAGO, L. F. F. **Caracterização da influência da velocidade de corte, pressão e granulometria de lixa no lixamento plano do** *Pinus elliottii*. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

No presente trabalho é avaliado o processo de lixamento da madeira de *Pinus elliottii*. O objetivo principal do estudo foi entender a influência e interação dos fatores de entrada (granulometria de lixa, velocidade de corte e pressão) sobre as variáveis de saída (taxa de remoção de material, temperatura, rugosidade, potência consumida, força de lixamento, emissão acústica e integridade superficial) no processo de lixamento plano da madeira de *Pinus elliottii,* processado paralelo às fibras. O lixamento foi realizado em uma lixadeira plana com sistema de monitoramento e aquisição de dados. Utilizou-se um delineamento em blocos completamente aleatorizados para realização do experimento. Foram utilizados quatro tipos de granulometrias de lixa, três velocidades de corte e três pressões, com seis repetições para cada combinação totalizando 216 tratamentos. Os resultados foram analisados através de uma análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%. Para taxa de remoção de material foi observado que a granulometria de lixa, pressão e velocidade influenciaram significativamente. Com relação à temperatura, somente a granulometria de lixa teve uma influência significativa no aquecimento do sistema. Para o acabamento superficial, apenas a granulometria de lixa influenciou significativamente na rugosidade. O consumo de potência foi influenciado pela velocidade de corte e pressão. Para força de lixamento, a granulometria de lixa e a pressão influenciaram significativamente. Na emissão acústica somente a granulometria de lixa influenciou significativamente no sinal captado. Para análise de imagens foram observados diferenças no acabamento conforme se aumenta a granulometria da lixa. Não foi observada nenhuma interação significativa entre os fatores velocidade de corte e pressão para todas as variáveis de saída estudadas.

PALAVRAS CHAVES: *Pinus elliottii,* Lixamento, Rugosidade.

SANTIAGO, L. F. F. **Characterization on abrasive process (cutting speed, pressure and grits size) on the** *Pinus elliottii* **wood.** 2011. 125 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

This study refers to about sanding process of *Pinus elliottii* wood following the direction of grain. The first aim of this work is trying to understand the influence of the following factors: belt speed, pressure and grit size on the output parameters of material remove rate, temperature, roughness, image analysis, cutting force, power consumption and acoustic emission. It was used a sanding belt with a data acquisition system to record the outputs variables. For the experiment it was used a randomized block design. The level of factors consider in the experiment were four size of grit, three levels of pressure and three levels of belt speed. The experiment total treatments of belt speed, pressure and grit size (3 x 3 x 4 = 36) was run with six replicates for a total of 216 experiments. The results of output parameters were analyzed through the analysis of variance (ANOVA) with level of significance 5%. All the factors were significant to the material remove rate. Only grit sizes were significant to the different levels temperature. The same behavior it was observed to the roughness where only grits sizes were significant. Differently the power consumption was not significant to the grits sizes but it was significant to the levels of pressure and belt speed. It was observed that grits sizes and pressure caused significant influence on cutting force. Only grit sizes were significant to the acoustic emission. It was observed on analysis of image that the coarse grit produces a rougher surface than the smooth grit and anatomical elements showed up more when smooth grit was used. It could not found any interaction between the factors to all outputs parameters.

KEYWORDS: *Pinus elliottii*, Sanding, Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama funcional, sistema de Aquisição de Dados (adaptado de PARK & MACKAY, 2003) 26
Figura 2 - Formas de energia de um sensor (adaptado de THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2008) 27
Figura 3 - Tipos de configurações para aplicação da pressão no lixamamento plano ..38
Figura 4 - Influência do tipo de abrasivo na rugosidade (adaptado de TAYLOR *et al.*,1999) 41
Figura 5 - Esquema da composição básica de uma lixa (NBR 14960/2003) 42
Figura 6 - Dureza Knoop para diferentes abrasivos (WINTER, 2009) 43
Figura 7 - Esquema da classificação mesh para os grãos abrasivos 44
Figura 8 - Emenda sobreposta sem raspagem dos grãos (NORTON, 2003) 48
Figura 9 - Emenda sobreposta com média raspagem dos grãos (NORTON, 2003) 48
Figura 10 - Emenda sobreposta com total raspagem dos grãos e remoção do adesivo (NORTON, 2003) 48
Figura 11 - Emenda de topo construído com filme no costado (NORTON, 2003) 49
Figura 12 - Emenda de topo em forma senoidal construído com filme no costado (NORTON, 2003) 49
Figura 13 - Emenda sobre topo construída com filme (NORTON, 2003) 50
Figura 14 - Comprimento para avaliação da rugosidade (NBR 6405/1988) 52
Figura 15 - Comprimento de amostragem (adaptado de NOVASKI, 1994) 53
Figura 16 - Linha média para um perfil de rugosidade (TIBURCIO, 2009) 54
Figura 17 - Rugosidade média (R_a) e desvio médio quadrático (R_q) (adaptado de MAHR, 2010) 55
Figura 18 - Procedimentos realizados na primeira etapa do desdobro inicial 57
Figura 19 - Esquema da primeira etapa de preparação dos corpos de prova 57
Figura 20 - Processo de preparação dos corpos de prova 58
Figura 21 - Enumeração e climatização dos corpos de prova 58
Figura 22 - Dimensões ideais do corpo de prova 59
Figura 23 - Amostras acondicionadas com teor de umidade de 12% UE 59

Figura 24 - Esquema das dimensões do suporte adaptado na lixadeira plana.....63
Figura 25 - Lixadeira plana com suporte adaptado 63
Figura 26 - Célula de carga modelo TBSPL 64
Figura 27- Módulo de emissão acústica, sensor (1) (2) e amplificador (3) 65
Figura 28 - Transdutor de corrente modelo TRX-I/U 66
Figura 29 - Amplificador da célula de carga TCA500.....67
Figura 30 - Programa de aquisição feito no software LabView® 7.1.....68
Figura 31 - Banco de ensaio com todos os componentes citados 69
Figura 32 - Regressão linear para força de lixamento.....73
Figura 33 - Rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 25+.....76
Figura 34 - Temperatura no ensaio de lixamento.....77
Figura 35 - Microscópico digital portátil para análise da integridade superficial.....77
Figura 36 - Influência do bloco sobre a taxa de remoção de material.....82
Figura 37 - Influência da pressão sobre a taxa de remoção de material.....83
Figura 38 - Influência da velocidade sobre a taxa de remoção de material 84
Figura 39 - Influência do bloco sobre a temperatura no lixamento.....86
Figura 40 - Acúmulo de material no abrasivo observado durante o lixamento 86
Figura 41 - Influência da pressão e velocidade na temperatura de lixamento 87
Figura 42 - Influência do bloco sobre a rugosidade no lixamento 90
Figura 43 - Influência da pressão e velocidade na rugosidade.....90
Figura 44 - Influência do bloco sobre a potência consumida no lixamento.....92
Figura 45 - Influência da velocidade sobre a potência consumida.....93
Figura 46 - Influência da pressão sobre a potência consumida.....94
Figura 47 - Influência do bloco sobre a força de lixamento.....96
Figura 48 - Influência da velocidade sobre a força de lixamento 97
Figura 49 - Influência da pressão sobre a força de lixamento.....98
Figura 50 - Influência do bloco sobre a emissão acústica.....100
Figura 51 - Influência da pressão e velocidade na EA 101
Figura 52- Superfície lixada com granulometria 80 mesh (plano tangencial), 50x 103
Figura 53 - Superfície lixada com granulometria 80 mesh (plano radial), 50x 103
Figura 54 - Superfície lixada com granulometria 100 mesh (plano tangencial), 50x .104

Figura 55 - Superfície lixada com granulometria 100 mesh (plano radial), 50x 105
Figura 56 - Superfície lixada com granulometria 120 mesh (plano tangencial), 50x .106
Figura 57 - Superfície lixada com granulometria 120 mesh (plano radial), 50x 106
Figura 58 - Superfície lixada com granulometria 220 mesh (plano tangencial), 50x .107
Figura 59 - Superfície lixada com granulometria 220 mesh (plano radial), 50x 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Aplicações dos abrasivos em função da granulometria (HAWKS, 1995)....45
Tabela 2 - Codificação utilizada para costado e papel (NORTON, 2003).....46
Tabela 3 - Classificação e características para o costado de tecido (NORTON, 2003) 47
Tabela 4 - Características técnicas da lixadeira plana.....62
Tabela 5 - Características técnicas da célula de carga modelo TBSPL.....64
Tabela 6 - Características técnicas do módulo de emissão acústica.....65
Tabela 7- Características técnicas do transdutor de corrente TRX-I/U.....66
Tabela 8 - Características técnicas do amplificador TCA500.....67
Tabela 9 - Características técnicas do bloco de conector NI BNC 2120 67
Tabela 10 - Níveis dos fatores variados no experimento 70
Tabela 11 - Valores da calibração da célula de carga 72
Tabela 12 - Valores da regressão linear para obtenção da força de lixamento 73
Tabela 13 - Fatores e seus níveis dentro de cada bloco de granulometria 78
Tabela 14 - Densidade média básica e aparente para o *Pinus elliottii* 79
Tabela 15 - Taxa de remoção de material média do lixamento.....81
Tabela 16 - Análise de variância para taxa de remoção de material 84
Tabela 17 - Temperatura média do lixamento.....85
Tabela 18 - Análise de variância para temperatura no lixamento 88
Tabela 19 - Rugosidade média do lixamento 89
Tabela 20 - Análise de variância para rugosidade no lixamento.....91
Tabela 21 - Consumo de potência média do lixamento 92
Tabela 22 - Análise de variância para potência consumida no lixamento 95
Tabela 23 - Força média de lixamento 96
Tabela 24 - Análise de variância para força no lixamento 98
Tabela 25 - Valores médios da máxima emissão acústica 99
Tabela 26 - Análise de variância para EA no lixamento.....101
Tabela 27 – Resumo dos resultados das variáveis de saída 108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	-	Analógico/ Digital
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	-	American National Standard Institute
ANOVA	-	Análise de Variância
CV	-	Coeficiente de Variação
D/A	-	Digital/Analógico
DAP	-	Diâmetro a Altura do Peito
DP	-	Desvio Padrão
DOS	-	Disk Operating System
E	-	Sistema da linha envolvente
EA	-	Emissão Acústica
GL	-	Graus de Liberdade
ISO	-	International Organization for Standardization
IC	-	Intervalo de Confiança
IPT	-	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
M	-	Sistema da linha média
MRR	-	Taxa de Remoção de Material
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
RMS	-	Root Mean Square
SQ	-	Soma de Quadrados
SQM	-	Soma de Quadrados Médios
USB	-	Universal Serial Bus
UE	-	Umidade de equilíbrio
VCC	-	Volt Corrente Continua
VCA	-	Volt Corrente Alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

D_{ap}	densidade aparente	[kg.m^{-3}]
D_b	densidade básica	[kg.m^{-3}]
D_a	densidade da água	[kg.m^{-3}]
G_n	granulometria da lixa	[mesh]
Knoop	escala de micro dureza	[kgf.mm^{-2}]
L_e	comprimento de amostragem (cut-off ou λ_c)	[mm]
L_m	comprimento de medição	[mm]
mesh	corresponde a quantidade de fios por polegada linear	-
m_i	massa inicial da amostra	[g]
m_s	massa seca amostra	[g]
m_f	massa final da amostra	[g]
m_{im}	massa da amostra imersa em água	[g]
m_v	massa da amostra saturada em água	[g]
N_{TP}	número total de pontos coletados nos ensaios	-
P_n	pressão	[kPa]
R_a	rugosidade média	[μm]
R_q	rugosidade média quadrática	[μm]
R_t	máxima distância pico a vale	[μm]
S_m	média das distâncias entre saliências	[μm]
t_p	fração de contato (parâmetro adimensional)	-
t_e	tempo estabelecido para o lixamento	[s]
$U_{(\%)}$	porcentagem de umidade	-
V_n	velocidade	[m.s^{-1}]
Δ_a	médias das inclinações das irregularidades do perfil	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 Objetivo... 17

1.2 Motivações para realização do trabalho 17

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

2.1 Lixamento da madeira 18

2.2 Monitoramento do processo de lixamento 24

2.3 Sistema de aquisição de dados 26

2.4 Características da madeira que influenciam no lixamento 30

2.5 Características e propriedades da madeira de *Pinus elliottii* 33

2.6 Conclusões sobre a revisão bibliográfica 35

3 ASPECTOS TEÓRICOS E TECNOLÓGICOS 37

3.1 Lixamento 37

3.1.1 Processo de lixamento 37

3.1.2 Composição das lixas 42

3.1.3 Acabamento superficial 50

4 MATERIAIS E MÉTODO 56

4.1 Matéria-prima e preparação dos corpos de prova 56

4.2 Determinação do teor de umidade 59

4.3 Análise física da madeira 60

4.3.1 Determinação da densidade aparente 60

4.3.2 Determinação da densidade básica 61

4.4 Lixamento dos corpos de prova 61

4.4.1 Descrição do banco de ensaio 62

4.4.2 Acondicionamento dos abrasivos 69

4.4.3 Condições de lixamento pré-estabelecidas 70
4.4.4 Variáveis mensuradas no experimento 70
4.4.5 Planejamento Experimental 78
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 79
5.1 Análise física da madeira de *Pinus elliottii* 79
5.2 Resultados do lixamento da madeira de *Pinus elliottii* 80
5.2.1 Taxa de remoção de material 80
5.2.2 Temperatura no lixamento 85
5.2.3 Rugosidade 88
5.2.4 Potência consumida 91
5.2.5 Força de lixamento 95
5.2.6 Emissão acústica 98
5.2.7 Análise da integridade superficial 101
5.2.8 Resumo dos resultados 108
6 CONCLUSÕES 109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 111
APÊNDICE A - ANÁLISE FÍSICA DA MADEIRA 118
APÊNDICE B - RESULTADO DO LIXAMENTO 120

1 INTRODUÇÃO

Atualmente madeiras provindas de florestas plantadas dos gêneros *Pinus* sp e *Eucalyptus* sp vêm substituindo o uso de madeiras nativas nos mais variados setores da indústria madeireira. Por serem materiais de fácil usinabilidade, pouco se tem buscado em melhorar os processos de fabricação que envolve essas espécies. No entanto, com a crescente expansão do setor e da maior utilização dessas espécies, torna-se importante estudar e conhecer as interações e efeitos dos parâmetros que envolvem o processo de lixamento, correlacionando-os com a qualidade final do produto. O conhecimento do processo de lixamento e as variáveis que o cercam contribuem para um aproveitamento racional da matéria-prima gerando maiores lucros e contribuindo para o fortalecimento do setor industrial madeireiro. Convém ressaltar que são poucos os pesquisadores, em nível mundial, que vêm buscando compreender o processo de lixamento de madeiras e as variáveis que o cercam. Processo este, que apresenta inúmeras variáveis que influenciam na qualidade do componente fabricado.

A utilização de produtos à base de madeira tem crescido, o que leva a indústria de transformação há buscar um aproveitamento mais racional dessa matéria-prima. Diferentemente de outros materiais, as madeiras variam suas propriedades químicas, físicas e mecânicas entre diferentes espécies, em uma mesma espécie e em uma mesma árvore. Visto isso, nota-se a necessidade de pesquisas que envolvam inúmeras variáveis e suas relações de forma a possibilitar um melhor conhecimento da usinagem desse material, assim contribuindo para uma maior eficiência no processamento final.

Em madeiras, o lixamento torna-se extremamente necessário sempre que se realiza o corte perpendicular às fibras, pois estas se rompem prejudicando o acabamento (GONÇALVES, 2000). Em muitas indústrias ainda há o conceito de que as lixas têm a função de corrigir os defeitos de processos que antecedem o lixamento. Na realidade, as lixas devem corrigir somente defeitos da usinagem que tenham surgidos por causa da própria madeira e não por defeito na ferramenta de corte. O lixamento deve remover pequenas impurezas que se incrustam na madeira durante o manuseio ou uma remoção de material para ajuste das dimensões. Pouco se conhece sobre os parâmetros que envolvem o lixamento de madeiras, utilizam-se muitos

conceitos práticos sem um conhecimento das melhores condições que envolvem esse processo.

1.1 Objetivo

Estudar a influência e interação dos fatores de entrada (granulometria de lixa, velocidade de corte e pressão) sobre as variáveis de saída (taxa de remoção de material, força de lixamento, potência consumida, emissão acústica, temperatura, integridade e acabamento superficial) no processo de lixamento plano da madeira de *Pinus elliottii*, processado paralelo às fibras.

1.2 Motivações para realização do trabalho

Para realização do presente trabalho teve-se como motivação a falta de estudos científicos voltados para o lixamento da madeira, especificamente no Brasil, sendo que em outros países como Alemanha, Canadá, Estados Unidos etc. possuem trabalhos nessa área, ainda escassos devido à complexidade envolvida entre o material e a usinagem por abrasivo. Além da falta de estudos científicos voltados para o processo de lixamento, emprega-se neste trabalho a espécie de *Pinus elliottii,* utilizada em diversos setores da indústria no Brasil, na qual conseqüentemente irá empregar o lixamento em seu processo produtivo, sendo ainda pouco estudada com relação ao seu comportamento no lixamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lixamento da madeira

Franz[1] *et al.* (1954 apud SALONI, 2007) realizaram um trabalho intitulado "*Machining wood with coated abrasive*" no qual estudaram os efeitos da pressão, velocidade da corte, área de contato, teor de umidade da madeira e o empastamento da lixa sobre a taxa de remoção de material, vida da lixa e o consumo de potência. Segundo Saloni (2007) o trabalho realizado por Franz *et al.* em 1954 é um dos trabalhos mais completos realizados nesta área apesar de ser muito antigo e apresentar algumas limitações como: não consideraram interações entre os fatores, não empregaram madeira de coníferas no estudo, não utilizaram a qualidade superficial como parâmetro de avaliação e os abrasivos minerais bem como a granulometria naquela época eram muito limitados se comparados aos atuais.

O trabalho realizado por Mckenzie[2] (1962 apud SALONI, 2007) estabeleceu uma relação teórica entre a geometria da ferramenta e forças de corte, características da superfície e propriedades mecânicas. De acordo com Saloni (2007) a qualidade superficial não foi considerada neste trabalho bem como a utilização de uma faixa limitada de granulometrias de lixa, além de não incluir madeiras de coníferas.

Koch em 1964 publicou um livro com o título "*Wood Machining Process*" onde aborda aspectos fundamentais da usinagem por abrasivo em um dos seus capítulos. O autor reúne trabalhos publicados na área de lixamento, características técnicas dos abrasivos bem como diversos tipos de equipamentos na área de lixamento da madeira.

Em 1966 Nakamura[3] (1966 apud SALONI, 2007) encontrou que a velocidade de

---

[1]Franz, N. C., Patronsky, L. A., Hiken, E. W. Machining Wood with Coated Abrasive. University of Michigan. n.2082.1954 apud SALONI, D. E. Process Monitoring and Control System Design, Evaluation and Implementation of Abrasive Machining Processes. 2007. 197 p. Thesis (PhD) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2007.

[2]Mackenzie, W. M. The Relationship between the Cutting Properties of Wood and its Physical and Mechanical Properties. Forest Product Journal. 1962 apud SALONI, D. E. Process Monitoring and Control System Design, Evaluation and Implementation of Abrasive Machining Processes. 2007. 197 p. Thesis (PhD) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2007.

[3]Nakamura, G. Studies of Wood sanding by belt-sander. Industrial test of plywood sanding by wide belt-sander. Tokyo Univ. Agric. And Technol. v.5, p. 17, 1966 apud SALONI, D. E. Process Monitoring and Control System Design, Evaluation and Implementation of Abrasive Machining Processes. 2007. 197 p. Thesis (PhD) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2007.

alimentação correlaciona-se inversamente a taxa de remoção de material. Pahlitzsch em 1970 detectou que a velocidade da lixadeira produziu um pequeno efeito sobre a qualidade superficial e foi independente da pressão. Stewart em 1974 observou que a potência no lixamento está correlacionada com a taxa de remoção de material, velocidade de alimentação, profundidade de corte, umidade e densidade da madeira.

Story[4] (1982 apud SALONI, 2007) criou um modelo que descrevia o comportamento da magnitude e variação da força em duas categorias básicas de lixamento. Para primeira foi fixada a força que era aplicada diretamente sobre a peça que estava sendo lixada, e a segunda fixava a taxa de corte para aplicações onde a taxa de alimentação era controlada.

Carrano (1997) não encontrou interações significativas nas operações de lixamento em seu trabalho, onde o tipo de abrasivo foi um parâmetro que afetou a rugosidade, mas não para remoção de material para grãos finos. Taylor *et al.* (1999) estudaram as interações de alguns parâmetros da usinagem por abrasivo para diferentes espécies de madeira, orientações de lixamento, tipos de abrasivo, pressões e granulometrias sobre a taxa de remoção de material e a rugosidade. Os autores concluíram que não houve interações significativas entre dois e três fatores para todos os níveis estudados. Com relação à taxa de remoção de material, a pressão foi um fator mais significante. Para o acabamento superficial, o abrasivo carbeto de silício apresentou os melhores resultados em relação ao óxido de alumínio, especialmente para tamanho de grãos médios. Com relação às espécies de madeiras estudas foi observado uma maior taxa de remoção de material para a conífera independente das granulometrias estudadas, enquanto que o acabamento superficial para a folhosa foi melhor do que para a conífera.

Ratnasingam *et al.* (2002) estudaram o lixamento da espécie Rubberwood (*Hevea brasiliensis*), utilizando uma lixadeira de banda larga, onde esses autores propuseram a variação de alguns parâmetros do equipamento com intuito de obter um melhor acabamento superficial, menor consumo de potência e observar o tempo de vida de

[4]Story, R. Estimating HP requirements for belt grinding operations. Abrasive Engineering Society Magazine apud SALONI, D. E. Process Monitoring and Control System Design, Evaluation and Implementation of Abrasive Machining Processes. 2007. 197 p. Thesis (PhD) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2007.

dois tipos de abrasivos no lixamento paralelo as fibras. Foi observado que a redução no tamanho dos grãos melhora o acabamento superficial; com o aumento da profundidade de corte foi observado uma piora no acabamento superficial; a taxa de remoção de material apresentou um crescimento conforme se aumentou a velocidade da lixa para mesma profundidade de corte. Com relação à eficiência dos abrasivos testados os autores observaram que a taxa de remoção de material ao longo do tempo se manteve mais eficiente para o carbeto de silício em relação ao óxido de alumínio. Esse melhor desempenho está atribuído a maior dureza do carbeto de silício segundo os autores. Para o consumo de potência foi observado que aumentando a velocidade de alimentação e a velocidade da lixa tem-se um maior consumo de potência.

Saloni *et al.* (2005) estudaram as variáveis que influenciam significativamente na taxa de remoção de material, rugosidade e o consumo de potência para o lixamento de diferentes espécies de madeira. Foram combinadas diferentes pressões, espécies de madeira, tipos de abrasivos, granulometrias e velocidades da lixa. Os resultados indicaram que a taxa de remoção de material pode mudar com variação da pressão, tipo de abrasivo, granulometria e a velocidade da lixa. O consumo de potência cresceu linearmente com o aumento da pressão. Ainda, o consumo de potência permaneceu estável para mesma pressão e velocidade independentemente da espécie de madeira e abrasivos utilizados. O valor da rugosidade para ambas as espécies estudadas (*Acer saccharum* e *Pinus strobus*) foi maior para o abrasivo óxido de alumínio comparado com carbeto de silício. Na maioria dos casos uma maior velocidade da lixa produziu um melhor acabamento superficial. As análises estatísticas mostraram significância para os níveis das variáveis estudadas, mas poucas interações significativas entre elas.

Moura & Hernández (2006) investigaram o acabamento superficial da espécie Maple (*Acer saccharum*) em função das combinações de diferentes tipos de abrasivos, granulometrias, velocidades de alimentação em uma lixadeira de banda larga. O lixamento foi realizado na direção paralela as fibras. De acordo com autores a utilização do conjunto de granulometrias 100-120 mesh produziu uma menor rugosidade e redução de danos superficiais em relação à utilização apenas da granulometria 100 mesh. Com a adição de um estágio de 150 mesh, ficando um conjunto de 100-120-150 mesh, não houve uma redução significativa da rugosidade,

no entanto houve uma redução dos danos superficiais causados pelos abrasivos. Segundo esses autores, com o aumento da velocidade de alimentação ocorreu um aumento das irregularidades da superfície lixada devido ao rápido arrancamento das fibras gerando um desfibramento na superfície. O acabamento superficial e a redução de danos gerados na superfície foram melhores para o abrasivo carbeto de silício comparado ao abrasivo óxido de alumínio, fato esse observado em outros trabalhos (Taylor *et al.*, 1999; Saloni *et al.*, 2005 e Ratnasingam *et al.*, 2002). No entanto, a superfície usinada com óxido de alumínio apresentou um menor tempo de absorção de líquidos comparado com carbeto de silício, onde segundo estes autores é uma vantagem na aplicação de revestimentos devido à rápida absorção em um menor tempo.

Javorek *et al.* (2006), com intuito de oferecer novas informações sobre o processo de usinagem com abrasivo, estudaram a combinação de algumas variáveis do lixamento sobre a força de corte e a potência consumida. O experimento consistiu na montagem de um sistema de aquisição de dados para captação da força de corte e da potência consumida no lixamento através de um sensor piezoelétrico (para captação da força) e um transdutor de potência (para captação potência consumida) em uma lixadeira plana. Segundo os autores a pressão apresentou um efeito significativo na potência consumida e na força de corte para todas as combinações. Outro fator que influenciou tanto a potência consumida como a força de corte foi à direção de corte nos diferentes planos anatômicos lixados, onde o maior efeito tanto para força de corte como para potência consumida foi no plano tangencial e menor efeito no plano radial para espécies estudadas. Uma possível explicação segundo os autores está relacionada à anatomia da madeira (o número de anéis de crescimento entre lenho de verão e inverno e a diferença de densidade), sendo um fator importante no processo de lixamento. A velocidade de corte teve uma influência menor comparada ao efeito do posicionamento dos planos no lixamento, assim como para as espécies e granulometrias estudadas, não apresentando uma tendência específica com relação à força de corte e potência consumida.

Saloni (2007) desenvolveu um sistema de monitoramento e controle da vida do abrasivo utilizando diversos tipos de sensores. O objetivo do trabalho foi projetar,

desenvolver e avaliar um sistema de controle e monitoramento do processo de usinagem por abrasivo para madeira e derivados de madeira. O sistema desenvolvido eleva a vida do abrasivo através da detecção do acúmulo de material na lixa por meio de um sensor óptico que aciona um sistema de limpeza para desobstrução da mesma. Esse acúmulo, segundo o autor, reduz o corte do abrasivo e eleva a temperatura do sistema devido ao maior atrito causando danos ao equipamento, abrasivo e material usinado. Além da limpeza da lixa, o sistema detecta o estado de afiação dos grãos abrasivos através de um sensor de emissão acústica que indica a perda do corte do abrasivo através de limites estipulados. Para o teste do funcionamento do sistema de controle e monitoramento foi utilizado uma lixadeira plana de cinta como protótipo.

Fotin *et al.* (2008) investigaram o consumo de potência no processo de lixamento da madeira do gênero *Birch* sp para diferentes combinações de granulometrias, velocidades de alimentação, profundidade de corte e direções de lixamento. O tipo de abrasivo utilizado foi o óxido de alumínio. Nesse experimento foi utilizada uma lixadeira de banda larga com um sistema de aquisição de dados acoplado para obtenção da potência consumida. As análises do consumo de potência no processo de lixamento em todas as combinações mostraram que o consumo aumenta com o aumento da velocidade de alimentação e a da profundidade de corte respectivamente, sendo que o maior consumo de potência ocorreu no lixamento perpendicular às fibras para todas as combinações de lixas. A combinação de granulometrias que gerou o menor consumo de potência foram 60, 80 e 100 mesh.

Tiburcio (2009) realizou a medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e o lixamento. O autor investigou a influência da velocidade de avanço no torneamento cilíndrico em conjunto com o processo de lixamento tubular vertical sobre a rugosidade. Neste experimento foram utilizadas diferentes velocidades de avanço no torno, espécies de eucalipto e conjuntos de granulometrias de lixa de óxido de alumínio. O autor concluiu que para os três conjuntos de lixas empregados, o conjunto de lixas com granulometrias 80 e 120 mesh, para desbaste e acabamento, respectivamente, foi aquele que apresentou o melhor desempenho quanto ao acabamento superficial para as duas espécies de eucalipto. Segundo o autor, o conjunto de lixas 80-120 mesh

apresentou, numa razão proporcional, uma variação de 4% no valor da rugosidade média para cada 4 $m.min^{-1}$ aumentado na velocidade de avanço do torneamento. O mesmo afirma que, em condições ótimas de lixamento, em média, a cada 0,1$mm.rot^{-1}$ de aumento no avanço por dente no torneamento, tem-se o aumento de 1% no valor da rugosidade média.

Porankiewicz *et. al* (2010) estudaram as variáveis dependentes e independentes do processo de lixamento plano para criação de um modelo estatístico que descrevesse a resistência da lixa, taxa de remoção de material e a velocidade de alimentação. Os autores propuseram que as variáveis de resistência da lixa, taxa de remoção de material e velocidade de alimentação é uma função da granulometria da lixa, pressão, ângulo de lixamento em relação às fibras, densidade e propriedades mecânicas da madeira. As análises dos resultados mostraram que a resistência da lixa sofreu uma influência da pressão, sendo que a influência da pressão sobre a resistência da lixa não seguiu uma ordem das propriedades físicas e mecânicas das espécies estudadas. A variação da granulometria influenciou na resistência da lixa, mas foi menos acentuada em comparação a pressão. A variação da inclinação das fibras em relação à resistência mostrou-se complexa segundo os autores. Com relação à taxa de remoção de material notou-se uma influência da pressão, ou seja, quanto maior a pressão maior a remoção de material. Com relação à granulometria da lixa, notou-se uma redução na remoção de material para tamanho de grãos menores. Para a inclinação das fibras observou-se que conforme se aumenta o ângulo de inclinação das fibras ocorre um aumento na remoção de material.

Varanda *et. al* (2010) estudaram a influência de quatro velocidades de corte (19,5; 22,7; 26 e 28,1 $m.s^{-1}$) e três conjuntos de granulometrias de lixa (80-100,80-120, e 100-120) em peças roliças de *Eucalyptus grandis* processadas através do lixamento tubular perpendicular as fibras. Em função da combinação dos fatores citados foi analisada a rugosidade, potência consumida, vibração e emissão acústica. De acordo com os autores as duas maiores velocidades de lixamento (26 e 28,1 $m.s^{-1}$) consumiram uma maior potência para os três conjuntos de lixas analisados. A velocidade de 22,7 $m.s^{-1}$ consumiu a menor potência em todos os conjuntos de lixas analisados. A velocidade de corte de 28,1 $m.s^{-1}$ foi responsável pela menor vibração e

pela maior emissão acústica na lixadeira, para os três conjuntos de lixas. Através dos resultados os autores concluíram que em todas as velocidades de lixamento analisadas, o conjunto de lixas 100-120 mesh resultou no menor valor de rugosidade média, ou seja, foi o conjunto de lixas que proporcionou o melhor acabamento superficial aos corpos de prova.

2.2 Monitoramento do processo de lixamento

O monitoramento do processo ou de uma máquina específica pode ser realizado por meio de inspeção humana, no qual é verificado o estado do processo ou ferramenta em determinados períodos de tempo, ou através de sensoriamento onde o tempo de resposta é muito mais ágil e preciso. Com o aumento da produção nas empresas e a necessidade de garantia de qualidade nos produtos fabricados houve a substituição do monitoramento feito pelo homem pelo sensoriamento do processo que garante uma resposta mais rápida e precisa em tempo real.

Saloni (2007) define o monitoramento do processo como uma atividade continua em tempo real na qual o status do processo é determinado a todo o momento. De acordo com mesmo autor o monitoramento do processo não deve ser confundido com o controle do processo, ou seja, no monitoramento do processo um sinal é gerado para informar uma condição específica, não possibilitando uma ação imediata. Diferentemente, o controle do processo tem-se essa possibilidade de ação imediata em função do sinal gerado. Exemplos de monitoramento são: potência consumida, vibração, emissão acústica, força de corte, torque, temperatura etc.

Jemielniak (1999) define o sistema de monitoramento como uma composição de sensores, amplificadores de sinais, cabos e receptores. Em seu trabalho o autor descreve diferentes tipos de sensores existentes no mercado (sensores para medir força, torque, potência, vibração, emissão acústica, câmeras, laser etc.) bem como suas aplicações específicas para cada tipo de monitoramento desejado.

Dornfeld (1984) realizou um trabalho sobre monitoramento e mostrou que os requisitos necessários para a implantação de sistemas de monitoramento incluem:

viabilidade de implantação, fácil aplicação e uma correlação muito próxima entre as saídas dos sensores com variáveis de operação.

Segundo Abellan-Nebot & Subiron (2009) existem dois métodos diferentes para monitoramento do processo: métodos de medição direta e indireta. O método de monitoramento por medição direta consiste na utilização de sensores a laser, óptico e ultra-sônico no qual iram realizar uma medição direta do estado de uma ferramenta ou de um processo, onde segundo esses autores são métodos muito caros e difíceis de serem aplicados no ambiente industrial. Em contraste, os métodos de monitoramento por medição indireta são mais econômicos e são baseados no sensoriamento de força de corte, potência, vibração, temperatura etc. De acordo com esses autores cada tipo de sensor tem uma aplicação mais adequada para aquilo que se deseja avaliar, como: desgaste de ferramenta, vibração excessiva, avarias em componentes de máquinas, acabamento superficial, conformidade geométrica, consumo de energia etc. Esses autores também classificam quatro tipos de sensores que são amplamente aplicados no monitoramento indireto: dinamômetros, acelerômetros, emissão acústica e sensores de corrente elétrica.

Thomazini & Albuquerque (2008) definem sensores como dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição etc. Um sensor, de acordo com esses autores, nem sempre tem características elétricas necessárias para ser utilizado em sistema de controle e monitoramento, sendo necessário um circuito de interface para amplificação do sinal gerado pelo sensor para sua efetiva utilização.

Os sensores utilizados no monitoramento podem ser classificados como sensores ativos ou passivos, onde os sensores passivos são aqueles cuja energia de saída é fornecida integralmente ou quase integralmente pelo sinal de entrada (ex: cristais piezelétricos, termômetro, bimetálico, fotovoltáico etc.). Já os sensores ativos necessitam de uma fonte auxiliar de energia que fornece maior parte da energia de saída (ex: extensômetros, potenciômetros etc.).

2.3 Sistema de aquisição de dados

Park & Mackay (2003) descrevem a aquisição de dados como o processo pelo qual fenômenos físicos do mundo real são transformados em sinais elétricos que são mensurados e convertidos em formato digital para o processamento, análise e armazenamento pelo computador. Segundo esses autores, na maioria das aplicações, o sistema de aquisição de dados não é designado apenas pela aquisição dos sinais elétricos, mas por atuar sobre o sistema através de controles (ex: abertura e fechamento de válvulas, relés, atuadores etc.).

Os elementos básicos de um sistema de aquisição de dados são mostrados no diagrama funcional da Figura 1.

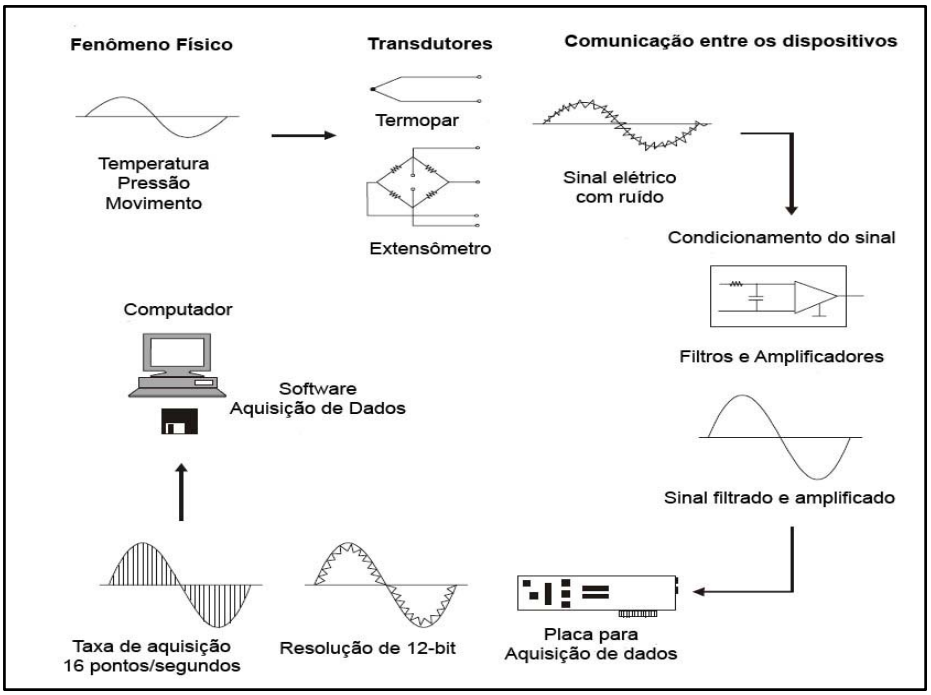

Figura 1- Diagrama funcional, sistema de Aquisição de Dados (adaptado de PARK & MACKAY, 2003)

Cada parte ilustrada no diagrama funcional da Figura 1 tem sua importância e características no sistema de aquisição de dados. A seguir serão descritos os elementos que compõe o sistema de aquisição de dados conforme ilustrado no diagrama funcional.

Como definido no Item 2.2, os sensores são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição etc. A Figura 2 ilustra essa definição (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2008).

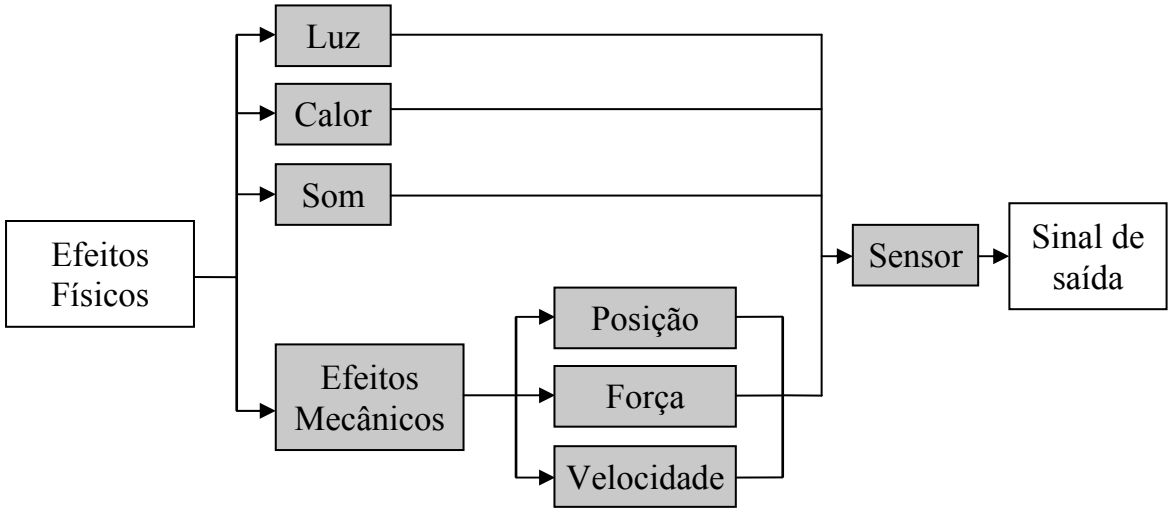

Figura 2 - Formas de energia de um sensor (adaptado de THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2008)

Os sensores podem gerar sinais analógicos ou digitais. Para os sinais analógicos o sensor pode assumir qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que dentro de sua faixa de operação. As grandezas físicas que podem assumir qualquer valor ao longo do tempo são: temperatura, pressão, velocidade, força, vazão, torque, luminosidade etc., onde essas variáveis são mensuradas por elementos sensíveis com circuitos eletrônicos não digitais. Já para os sinais digitais, os sensores podem assumir apenas dois valores no sinal de saída ao longo do tempo, que podem ser interpretados como zero ou um. Não existem naturalmente grandezas físicas que podem ser mensuradas dessa forma, mas elas são convertidas através de circuitos eletrônicos. Exemplos são: detecção de passagem de objetos, encoders na determinação de distância ou velocidade etc. (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2008).

O transdutor é um dispositivo completo, que contém o sensor, usado para transformar uma grandeza qualquer em outra que pode ser utilizada nos dispositivos de

controle. Um transdutor pode ser considerado uma interface às formas de energia do ambiente e o circuito de controle ou eventualmente entre o controle e o atuador. Os transdutores transformam uma grandeza física (temperatura, pressão etc.) em um sinal de tensão ou corrente que pode ser interpretado facilmente por um sistema de controle. Muitas vezes os termos “sensor” e “transdutor” são usados indistintamente, onde neste caso, o transdutor é um circuito completo que engloba o sensor e todos os circuitos de interface capazes de serem utilizados numa aplicação industrial (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2008).

Outra característica existente é a forma com que o transdutor irá transmitir os sinais recebidos dos sensores. Esse dispositivo transmite os sinais é conhecido como transmissor. O transmissor prepara o sinal de saída do transdutor para utilização a distância, fazendo certas adequações ao sinal os quais se chamam padrões de transmissão de sinais. Um exemplo é o do tipo “*loop*” 4 a 20 mA, um padrão de transmissão de sinais em corrente. O termo transmissor também é utilizado para dispositivos que integram um sensor, transdutor e transmissor no mesmo componente (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2008).

Além dos sensores, temos a comunicação entre dispositivos que representa as conexões físicas dos transdutores e sensores, através de cabos ou outras formas de comunicação, para condução do sinal até a aquisição por um determinado receptor. Quando a condução do sinal e/ou aquisição dos dados é condicionada remotamente para um computador pessoal (microcomputador) para armazenamento e processamento dos dados existe um interface (ligação) física para condução do sinal. Quando a ligação entre os dispositivos é feita por cabeamento estará sempre sujeita a ruídos nos sinais elétricos gerados pelos sensores, que causam distorções nos resultados, principalmente em ambientes industriais agressivos. Para que isso seja amenizado é necessária a utilização de cabos blindados e realizar aterramentos nos equipamentos para que o efeito do ruído não interfira no resultado final (PARK & MACKAY, 2003).

O sinal elétrico gerado pelo transdutor ou transmissor precisa ser convertido em uma forma aceitável, na qual o receptor (microcomputador) possa adquirir esses dados para o processamento. Essa conversão transforma os sinais analógicos em sinais

digitais ou como é conhecida conversão A/D através de circuitos eletrônicos. Além da conversão A/D, existem outras formas de condicionamento que precisam ser realizadas nos sinais elétricos como: filtragem (ex. filtros passa banda, passa alta, passa baixa), amplificação, linearização, isolação elétrica, excitação dos sensores por corrente elétrica (PARK & MACKAY, 2003).

A parte física para aquisição de dados e controle pode ser definida como todos os componentes que pertencem ao sistema de aquisição de dados, que executam as seguintes funções:

- Entrada de sinais: conversão de sinais analógicos para digitais A/D, armazenamento e processamento para análise;

- Saídas de sinais: conversão de sinais digitais para analógicos D/A, para o controle do processo.

Existem diversos componentes disponíveis no mercado para aquisição de dados, de diversas formas e diferentes fabricantes. Um exemplo de componente comumente utilizado é a placa para aquisição de dados que é conectada diretamente em um barramento na placa mãe do computador. Outra forma de componente são os dispositivos individuais que são programados e atuam independente do computador na aquisição de dados via interface R-232, conhecidos como "*stand-alone logger*".

Os componentes da aquisição de dados (parte física) não trabalham sem os softwares, programas que codificam, manipulam e armazenam os sinais enviados pelos componentes do sistema de aquisição de dados. Os softwares podem ser executados em sistemas operacionais que realizam uma única tarefa de cada vez (ex. DOS), ou executados em sistemas operacionais que realizam diversas tarefas ao mesmo tempo (ex. Windows, Unix, Linux etc.). Os softwares podem ser obtidos em conjunto com os componentes (parte física) e são específicos para executar determinadas tarefas, não sendo possível sua manipulação, ou podem ser criados para se comunicar com a parte física da aquisição de dados. Neste ponto podem-se ter duas linhas de plataformas para programação de software para aquisição de dados: os programas conhecidos como C,

Assembly etc., que utilizam uma plataforma de programação de baixo nível, onde é possível criar via código softwares para receber e manipular os dados; ou pode-se recorrer a plataformas especializadas que utilizam uma linguagem de programação gráfica como LabView, Labtech etc., sendo necessário a utilização de componentes específicos destas empresas para comunicação entre as partes (PARK & MACKAY, 2003).

2.4 Características da madeira que influenciam no lixamento

A madeira é um material natural formado por diferentes tipos de células que são compostas por diferentes substâncias químicas produzindo um material heterogêneo. Essa constituição heterogênea faz com que a madeira seja um material anisotrópico, ou seja, dependendo do sentido em que o material for analisado o mesmo possui diferentes propriedades.

Segundo Saloni (2007) o processo de lixamento envolve a mudança da topografia da superfície da madeira pela ação de um material abrasivo. O processo de remoção de material por abrasivo produz pequenas partículas (cavacos), que são provenientes da remoção das fibras da madeira, onde devido à variabilidade do material madeira podem ocorrer falhas neste local, sendo de suma importância o conhecimento das características anatômicas, físicas e químicas da madeira para o entendimento do mecanismo de lixamento.

As principais substâncias químicas que compõem a madeira são: celulose, lignina, hemiceluloses e constituintes menores. A celulose, hemiceluloses e lignina são os principais constituintes da parede celular. De acordo com D'Almeida (1988) as madeiras possuem as seguintes proporções médias desses constituintes químicos: celulose em torno de 50%, hemiceluloses em torno de 20% e lignina em torno de 15 a 35%. Os constituintes menores, que são a soma de compostos orgânicos (extrativos) e inorgânicos (cinzas) chegam a até 10%.

Diversos fatores inerentes a madeira fazem com que essa seja um material preferido para ser usado em diversas aplicações, mas sem dúvida um atributo importante é sua disponibilidade em diversas espécies, dimensões e configurações que

se adequam a uma vasta gama de aplicações. A madeira possui uma alta taxa de resistência mecânica em relação ao seu peso e uma notável durabilidade e desempenho como material estrutural. A madeira seca possui ótima propriedade isolante contra o calor, som e eletricidade. A madeira tende a absorver e dissipar vibrações em algumas condições de uso, e ainda é um material incomparável para utilização em instrumentos musicais. O arranjo das fibras na madeira faz dela um ótimo material estético, podendo ser aplicado diversos produtos para o acabamento superficial como tintas, vernizes etc. Possui fácil trabalhabilidade, ou seja, é transformada em diversas formas e é fixada facilmente com adesivos, pregos, cavilhas, parafusos, buchas etc. Além disso, a madeira é resistente a oxidação, possui resistência ao impacto, pode ser tratada com preservantes e retardantes de fogo bem como ser combinada com diferentes tipos de materiais (FPL, 1999).

Apesar de uma série de fatores positivos observados no parágrafo anterior que fazem do material uma fonte para diversas aplicações é necessário conhecer seus pontos negativos. A madeira é um material biodegradável, ou seja, algumas madeiras são atacadas facilmente por organismos xilófagos como fungos, insetos e até bactérias, onde em muitas aplicações são necessários preservantes para evitar o ataque desses organismos. O material é de fácil combustão. Isto pode ser considerado um ponto positivo na área de energia, mas em outras aplicações se torna um ponto negativo. É um material higroscópico, ou seja, absorve facilmente umidade do ambiente e muitas propriedades da madeira como resistência mecânica variam com o teor de umidade. Como a madeira é um material natural, sua produção e propriedades estão sujeitas a influências do meio em que a mesma está inserida, levando a produção de um material completamente heterogêneo.

As madeiras podem ser classificadas taxonomicamente em duas categorias, de acordo com os grupos vegetais: Gimnospermas e Angiospermas. As madeiras de Gimnospermas, especialmente as coníferas, são denominadas resinosas, não porosas por não possuírem vasos condutores de líquidos em sua anatomia, ou ainda são conhecidas como *"Softwood"*, e são produzidas por espécies da ordem Coniferales. As madeiras de Angiospermas, especialmente as dicotiledôneas são denominadas folhosas ou conhecidas como "*Hardwood"*, são porosas por possuírem vasos condutores de

líquidos. Existem muitas diferenças entre coníferas e folhosas que vão desde a parte anatômica macro e microscópica, propriedades físicas e químicas da madeira.

Ratnasingam & Scholz (2004) explicam que existe um efeito das características anatômicas da madeira sobre o processo de lixamento como: Anéis de crescimento, madeira anormal, proporção entre madeira de cerne e alburno, textura, extrativos etc., que são características que devem ser consideradas. A proporção de anéis de crescimento e madeira de cerne e alburno varia com a posição de corte na árvore, e suas proporções iram influenciar na força de lixamento e no resultado da qualidade da superfície lixada. Estes autores enfatizam que as madeiras com poros menores (textura fina) produzem uma superfície de baixa qualidade oposta a madeiras com poros maiores (texturas mais grossas), devido às superfícies com texturas mais grossas esconderem as marcas e riscos produzidos no lixamento sobre a superfície. Os elementos inorgânicos e orgânicos da madeira como sílica e extrativos causam um efeito sobre o desempenho do processo de lixamento, elevando o desgaste da lixa e provocando seu entupimento e conseqüentemente reduzindo seu corte. A anatomia das folhosas é mais complexa do que as das coníferas, o que torna muito mais difícil avaliar os efeitos do lixamento para folhosas em relação às coníferas.

Segundo Saloni (2007) as propriedades físicas da madeira devem ser avaliadas com relação o desempenho do processo de lixamento. Como dito anteriormente, o processo de remoção de material por abrasivo produz pequenas partículas que são provenientes da remoção das fibras, e as características dessa remoção de material iram depender da resistência que as fibras da madeira impõem sobre o abrasivo. Essa resistência é dependente das propriedades físicas da madeira. Dependendo da umidade em que madeira está à mesma produz um efeito sobre o comportamento durante o lixamento. A resistência das fibras no lixamento é reduzida conforme a umidade na madeira vai aumentando até o ponto de saturação das fibras, onde madeiras com alto teor de umidade são facilmente lixadas, mas como conseqüência, ocorre o entupimento da lixa pelo material que adere ao abrasivo, e os defeitos como grã arrepiada são acentuados devido à alta umidade.

De acordo com Saloni (2007) outra característica física que influencia no processo de lixamento é a temperatura. Temperaturas excessivas reduzem a resistência

das fibras ao lixamento, e em alguns casos podem causar a queima da superfície da madeira criando uma descoloração e redução da capacidade de absorção da superfície para materiais de acabamento. Esse efeito da queima superficial é pronunciado com a redução da umidade. Ainda segundo o autor, a densidade do material também influencia no processo de lixamento, ou seja, quanto maior a densidade ocorre maior resistência do material a remoção das fibras e menor densidade mais facilmente esse material é removido. Tanto madeiras de coníferas como de folhosas muito densas apresentam maior resistência a remoção de material, ocorrendo dificuldades em remover riscos e marcas provindos desse processo. Recomenda-se a utilização de abrasivos com grãos menores e afiados quando forem utilizadas madeiras densas no processo de acabamento final evitando esse tipo de falha.

Ratnasingam & Scholz (2004) verificaram que o tipo de textura da madeira influencia no processo de lixamento. Madeiras com maior textura como as espécies de Red oak (*Quercus* sp) e Ash (*Fraxinus* sp.) possuem células mais largas com poros abertos nos quais tendem a esconder mais facilmente as marcas dos abrasivos na superfície, enquanto espécies com texturas mais finas, com poros muito pequenos como Maple (*Acer* sp.) e Ebony (*Diospyros* sp) tendem a mostrar mais facilmente as marcas do lixamento, ou seja, pior acabamento. Madeiras com alto teor de resina como Hemlock (*Tsuga* sp) and Spruce (*Picea* sp), assim como bolsas de resina como Pine (*Pinus* sp) e Jelutong (*Dyera* sp), ou extrativos e óleos como Rosewood (*Dalbergia* sp) e Teak (*Tectona* sp) causam dificuldade quando lixadas com abrasivos de grãos menores (finos), devido essas substâncias tenderem a entupir facilmente os espaços vazios entre os grãos das lixas.

2.5 Características e propriedades da madeira de *Pinus elliottii*

O gênero *Pinus* sp possui características anatômicas que o diferenciam de outras espécies arbóreas como: folhas em formato de acículas (agulhas); sementes não protegidas (Gymnosperma) que ficam armazenadas em estruturas em formato de cone (pinha); a arquitetura da copa da árvore possui formato de cone; suas folhas persistem durante o ano todo (perene); possui um formato do tronco mais cilíndrico (regular); os

anéis de crescimento da árvore são visíveis, sendo divididos em lenho inicial (formado durante a primavera-verão) e lenho tardio (formado durante outono-inverno); sua madeira tem cor clara variando de branco a amarelada; possui um arranjo da estrutura anatômica microscópica mais simples em relação as folhosas (Angiospermas), sendo constituído por cerca de 95% de traqueídeos (fibras).

Segundo Shimizu & Medrado (2010) no Brasil o gênero *Pinus* sp vêm sendo plantado há mais de um século, tendo sido, inicialmente, introduzido para fins ornamentais. Somente a partir de 1950 o gênero começou a ser plantado em escala comercial para produção de madeira. Sua principal utilização é como fonte de matéria-prima para as indústrias de madeira serrada e laminada, chapas, resina, celulose e papel.

Segundo Shimizu & Medrado (2010) existem duas variedades da espécie *Pinus elliottii* que ocorrem no sul dos Estados Unidos. A variedade *Pinus elliottii*. var. *elliottii*, amplamente utilizada como matéria-prima na indústria de beneficiamento na forma de madeira serrada, laminada, papel e celulose, extração de resina, embalagens; e a variedade *Pinus elliottii* var. *densa*, que em comparação com o *Pinus elliottii* var. *elliottii* possui um crescimento mais lento, acículas mais longas e densas, ramos mais grossos, madeira mais densa, casca mais grossa e cones (pinhas) menores. Além disso, essa variedade apresenta copa irregular, baixa produtividade de madeira o que não despertou o interesse comercial para esta variedade.

De acordo Shimizu & Medrado (2010) o *Pinus elliottii* var. *elliottii* é a variedade que é plantada no Brasil nas regiões Sul e Sudeste, porém em menor escala em relação ao *Pinus taeda* devido o mesmo ser muito empregado na indústria de celulose e papel. O *Pinus elliottii* var. *elliottii* é empregado para o processamento mecânico e na extração de resina. O *Pinus elliottii* var. *elliottii* em comparação com *Pinus taeda* apresenta algumas características marcantes como: exsudação de resina mais abundante pelos cortes e ferimentos na madeira, ramos e acículas mais densas, longas e de coloração mais escura; cones com pedúnculo e escama sem espinho.

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2009) a madeira de *Pinus elliottii* apresenta diversas características que devem ser levadas em consideração para a sua aplicação, onde essas características estão relacionadas à sua baixa durabilidade

natural, boa trabalhabilidade, baixa resistência mecânica etc. Segundo o IPT (2009) os usos da madeira de *Pinus elliottii* podem ser aplicados na construção civil em partes internas como**:** ripas, cordões, guarnições, rodapés, forros e lambris e partes secundárias de estruturas; construção civil, uso temporário como: forma para concreto, pontaletes e andaimes; além disso, tem-se a aplicação em móveis como**:** cama, tampos de mesa, fundos, estrutural em geral e outros usos como: cabos de vassoura, palitos de dente, chapas compensadas, lâminas decorativas, peças torneadas, artigos de esporte e brinquedo, embalagens, bobinas e carretéis.

A madeira de *Pinus elliottii* possui diversas aplicações em função de suas características e deve-se notar que a mesma é amplamente aplicada em diversos ramos da indústria, onde como conseqüência essa madeira é submetida, na maioria das vezes, em processos de lixamento para o desbaste e acabamento superficial, onde muitas vezes utilizam-se de conceitos empíricos sem um conhecimento técnico e científico da influência das variáveis que cercam esse processo, o que justifica o estudo da influência das variáveis da operação de lixamento para essa espécie.

2.6 Conclusões sobre a revisão bibliográfica

Através da revisão bibliográfica observou-se que as pesquisas na área de lixamento estão voltadas para o entendimento das relações e influências existentes entre as variáveis do processo (velocidade de corte, pressão, espécies de madeira, tipos de abrasivos, granulometrias de lixa) sobre as variáveis de saída (acabamento superficial, taxa de remoção de material, força de lixamento, potência consumida etc.), visando-se compreender e criar padrões para que se possa aperfeiçoar o processo e obter melhores resultados e desempenho tanto nos equipamentos como no material usinado. A grande dificuldade observada corresponde à variabilidade do material madeira, que por ser um material natural, impõem grandes desafios para o estabelecimento de padrões para obtenção de melhores resultados na usinagem por abrasivos. Observou-se também, que as técnicas de monitoramento do processo através de sensores melhoram o desempenho do processo e dos equipamentos, devido ao acompanhamento em tempo real, onde essas técnicas permitem prolongar a vida

dos componentes e antecipar a troca desses, evitando danos ao material usinado e equipamentos, conseqüentemente tem-se um processo mais equilibrado gerando maior confiabilidade e economia para empresas. Além do conhecimento do monitoramento e das interações existentes nos parâmetros do processo, deve-se também conhecer mais afundo o material usinado, pois conhecendo as características do material pode-se traçar estratégias para melhorar a operação de lixamento, proporcionando uma maior qualidade ao acabamento final do produto usinado.

3 ASPECTOS TEÓRICOS E TECNOLÓGICOS

3.1 Lixamento

A usinagem através do lixamento pode ser dividida em duas classes. A primeira classe refere-se à regularização de uma superfície usinada anteriormente para uma nova superfície relativamente lisa e plana (operação de desbaste). A segunda classe está relacionada com a preparação da superfície da madeira para aplicações subseqüentes de materiais de acabamento, como vernizes, tintas, seladores, revestimentos etc. 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 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).

3.1.1 Processo de lixamento

Segundo Saloni (2007) a usinagem por abrasivo é o processo de remoção de material através da ação do corte de materiais abrasivos onde se obtém uma superfície final acabada ou um determinado corpo com dimensões desejadas. O processo de usinagem por abrasivo é importante não somente devido sua complexidade, mas também porque é a última etapa antes da aplicação do acabamento final e defeitos ocasionados no lixamento geram altos custos em material, trabalho realizado, equipamento e retrabalho para corrigir esses defeitos. O lixamento é difícil de ser caracterizado através de equações matemáticas devido a uma série de variáveis aleatórias que cercam esse processo que envolve tanto os materiais abrasivos como equipamentos e a madeira.

Tem-se então no processo de lixamento variáveis controladas e não controladas. As variáveis não controladas são aquelas relacionadas ao material usinado e ao processo, onde devido sua variabilidade característica são difíceis de serem

dimensionadas e irão influenciar no resultado final, sendo necessário executar o experimento com máxima aleatoriedade para a distribuição dessas influências. Exemplos dessas variáveis são: material anisotrópico (madeira), variação da densidade etc. As variáveis controladas também irão influenciar no processo de lixamento, sendo possível estipular seus valores e mantê-los fixos em determinadas faixas e verificar sua influência sobre o resultado final. Exemplos de variáveis controladas são: umidade da madeira, pressão aplicada, velocidade de corte, velocidade de alimentação, tipo de abrasivo, granulometria do abrasivo etc.

A seguir serão descritos as variáveis que envolvem o processo de lixamento e suas influências sobre o resultado final.

- Pressão aplicada

A pressão aplicada sobre a peça no lixamento plano é caracterizada por uma determinada força sobre uma área específica, e dependendo da configuração da lixadeira essa pressão pode ser aplicada sobre a peça de madeira fixa e a lixa em movimento ou a peça de madeira e a lixa em movimento. A Figura 3 ilustra um esquema das formas de se aplicar a pressão em função da configuração da lixadeira no lixamento plano.

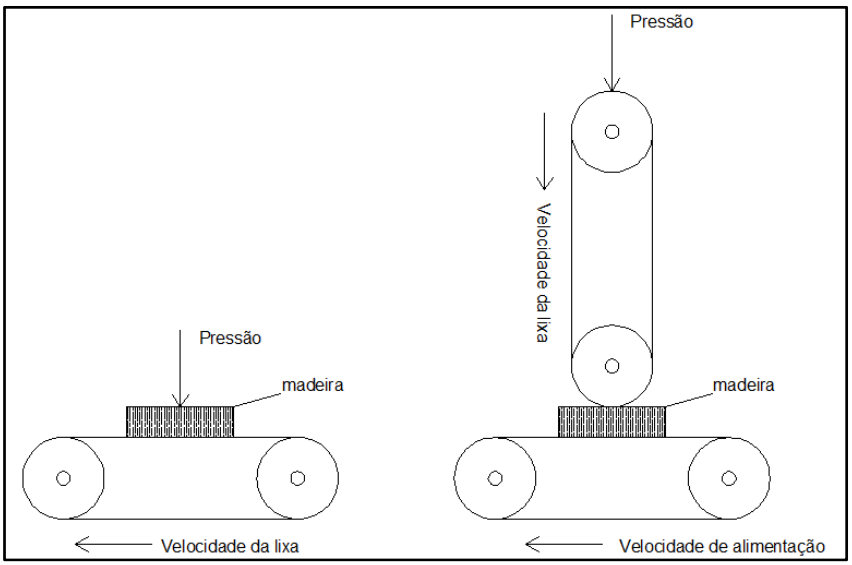

Figura 3 - Tipos de configurações para aplicação da pressão no lixamamento plano

A pressão exerce influência significativa sobre a taxa de remoção de material, isto foi observado nos trabalhos realizados por Franz & Hinken (1954), Taylor *et al.* (1999), Saloni *et al.* (2005), Javorek *et al.* (2006), Porankiewicz et. al (2010), que verificaram uma influência da pressão sobre a remoção de material no processo de lixamento.

Saloni *et al.* (2005) observaram que um incremento da pressão em 30% provocou um aumento de 22 a 45% no consumo da potência. Essa faixa de variação apresentada se deve a combinação de outros fatores empregados que influenciam no consumo de potência, mas o que deve-se notar é que a pressão eleva o consumo de potência da máquina com uma tendência de crescimento linear. Ratnasingam *et al.* (2002), Javorek *et al.* (2006), Porankiewicz et. al (2010) observaram o mesmo tipo de tendência com relação ao aumento da pressão e o consumo de potência.

Ratnasingam *et al.* (1999) destacam que o efeito da pressão reduz a vida do abrasivo, onde aumentando-se a pressão eleva-se a taxa de remoção de material, a temperatura da lixa e a carga sobre a mesma o que acarreta danos ao abrasivo.

Com relação ao acabamento superficial, os trabalhos realizados por Taylor *et al.* (1999) e Saloni *et al.* (2005) não encontraram uma melhora na rugosidade com relação a pressão nas espécies de madeiras estudadas.

Outra variável que pode influenciar que está relacionada diretamente com a pressão é a profundidade de corte, onde nos trabalhos realizados por Ratnasingam *et al.* (2002) e Fotin *et al.* (2008) observaram que um aumento da profundidade de corte para lixadeiras de banda larga ocorreu um aumento da potência consumida e ainda ocorreu uma piora no acabamento superficial.

- Velocidade de corte

A velocidade de corte corresponde à velocidade no qual o abrasivo passa sobre a superfície da peça usinada. Saloni *et al.* (2005) identificaram que a velocidade de corte influenciou no consumo de potência, acabamento superficial e taxa de remoção de material.

Ratnasingam *et al.* (1999) destacam que maiores velocidades conduzirão a uma maior remoção de material, mas levará a um aumento da temperatura causando danos ao abrasivo e material usinado, sendo necessário encontrar uma velocidade ideal para usinagem.

O principal problema observado por Saloni (2007), Ratnasingam & Scholz (2004) para elevadas velocidades de corte está relacionado ao aquecimento da lixa, que para madeiras que contém resina, faz com que ela seja derretida e resfriada rapidamente entupindo os espaços vazios dos grãos da lixa, aumentando ainda mais a temperatura e reduzindo sua afiação e conseqüentemente sua eficiência, onde como conseqüências podem causar danos de queima superficial na madeira e danificar o equipamento. Esse efeito é mais pronunciado para grãos menores onde os espaços entre os grãos são menores ocorrendo mais facilmente o entupimento.

- Efeito do tipo de abrasivo

Os tipos de abrasivos mais empregados tanto nas indústrias madeireiras como em trabalhos científicos são: óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbeto de silício (SiC).

Taylor *et al.* (1999) não encontraram um efeito significativo de ambos os abrasivos citados com relação a taxa de remoção de material para as espécies de madeira estudada. Para o acabamento superficial observou-se um efeito significativo para grãos maiores na rugosidade para o carbeto de silício em comparação ao óxido de alumínio, ou seja, em grãos maiores o carbeto de silício produziu uma superfície com uma rugosidade menor, isto pode ser observado na Figura 4, onde conforme o tamanho do grão vai diminuindo não existe uma diferença significativa entre as rugosidades para ambos os abrasivos estudados. Na maioria das espécies estudadas nesse trabalho o carbeto de silício produziu um melhor acabamento em relação ao óxido de alumínio segundo esses autores. Esses mesmos resultados foram observados por Saloni *et al.* (2005).

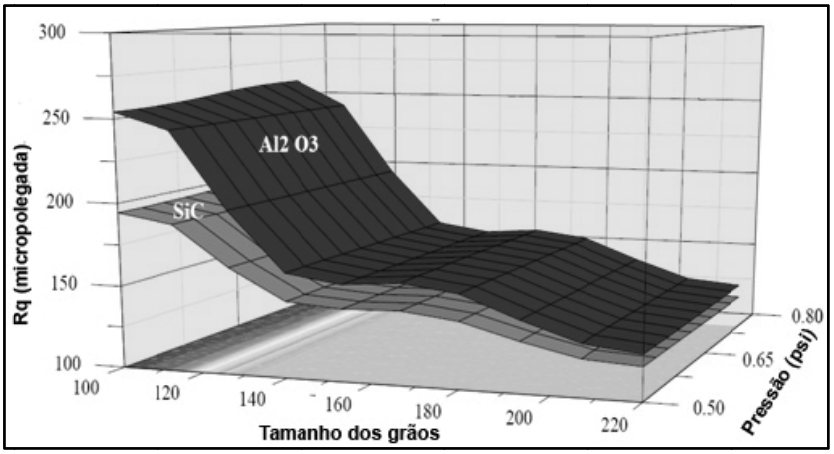

Figura 4 - Influência do tipo de abrasivo na rugosidade (adaptado de TAYLOR *et al.*,1999)

Ratnasingam *et al.* (2002) verificaram que o carbeto de silício em relação ao óxido de alumínio é mais eficiente para remoção de material ao longo do tempo, ou seja, com o carbeto de silício obteve-se um melhor desempenho na remoção de material sem perda de corte dos abrasivos ao longo do tempo, e isso está atribuído a maior dureza do carbeto de silício.

Moura & Hernández (2006) avaliaram os efeitos dos parâmetros do processo de lixamento no acabamento superficial da madeira de Maple (*Acer saccharum*) e constataram que o acabamento superficial e a redução de danos gerados na superfície foram melhores para o abrasivo carbeto de silício comparado ao abrasivo óxido de alumínio. No entanto, a superfície usinada com óxido de alumínio apresentou um menor tempo de absorção de líquidos comparado com carbeto de silício, sendo uma vantagem no tempo de absorção de revestimento segundo esses autores.

- Efeito da madeira

A madeira exerce uma influência grande no processo de lixamento devido sua variabilidade. Pode-se ter influência da densidade da madeira, ou seja, madeiras densas podem consumir maior potência, gerar maior atrito e em conseqüência maior temperatura o que é prejudicial ao equipamento, abrasivo e a apropria madeira. Madeiras que possuem muitos extrativos (principalmente resina) tendem a liberar esses extrativos devido à temperatura fazendo com que esses extrativos incrustem na

lixa reduzindo sua eficiência de corte e elevando a temperatura. Madeiras que possuem muita sílica podem prejudicar o corte dos abrasivos reduzindo sua vida. O teor de umidade da madeira irá influenciar no lixamento, onde madeiras com baixo teor de umidade oferecem maior resistência ao lixamento gerando maior temperatura, mas produzem um melhor acabamento. A madeira mais úmida oferece menor resistência à remoção das fibras gerando menor temperatura e pior acabamento. Com relação às espécies de coníferas e folhosas iram influenciar no lixamento devido à composição dessas duas classes serem completamente diferentes, ou seja, possuem arranjos anatômicos diferentes, e isso irá influenciar principalmente no acabamento superficial, taxa de remoção de material, consumo de potência e uma serie de outras variáveis que fazem do lixamento da madeira um processo complexo e de difícil modelagem.

3.1.2 Composição das lixas

Segundo NBR 14960/2003 “lixa” (abrasivo revestido) é um produto fabricado com a deposição de grão de mineral abrasivo, previamente classificado a um tamanho especificado, sobre um costado de papel, tecido, fibra vulcanizada, filme plástico ou combinação (papel + tecido), e unidos por camadas de adesivo que são curadas para ter a forma sólida. A Figura 5 ilustra a composição básica de uma lixa.

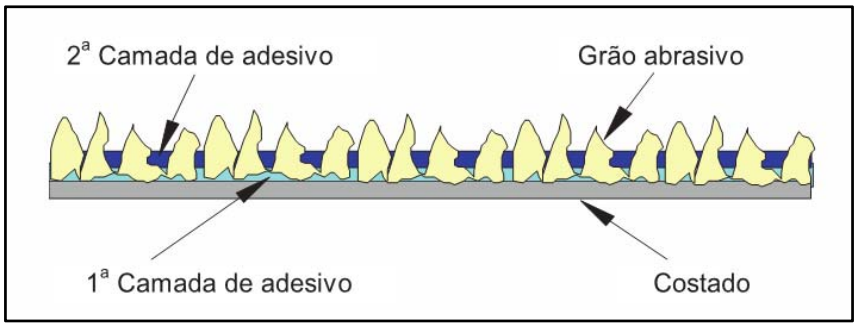

Figura 5 - Esquema da composição básica de uma lixa (NBR 14960/2003)

A seguir serão descritos cada elemento, exemplificados na Figura 5, que compõem uma lixa e suas principais características.

- MATERIAIS ABRASIVOS

Segundo Stemmer (1992) uma das qualidades importantes dos abrasivos do ponto de vista de sua utilização como ferramenta de corte é sua dureza. Dentre os diversos métodos de medição de dureza para abrasivo o mais empregado corresponde à micro dureza Knoop. O método consiste em penetrar uma ponta de diamante lapidada na forma piramidal em um material, sob cargas que podem variar entre 10 até mais de 300 gramas. A dureza Knoop é especificada pela mediação do perfil produzido pelo diamante no material e relacionado com a carga aplicada, sendo sua unidade em [$kgf.mm^{-2}$]. A Figura 6 ilustra a dureza Knoop para diferentes materiais abrasivos. Além da dureza, é importante que os abrasivos tenham como características uma boa tenacidade (resistir a impactos sob a ação dos esforços de choque), resistência química (devido à geração de calor entre lixa e peça obra podem ocorrer modificações químicas) e friabilidade (capacidade do grão abrasivo gerar novas arestas cortantes).

Os abrasivos podem ser divididos em duas classes, naturais e sintéticos. Devido à menor variabilidade e qualidade na produção dos abrasivos nos dias atuais são utilizados para composição das lixas os abrasivos sintéticos.

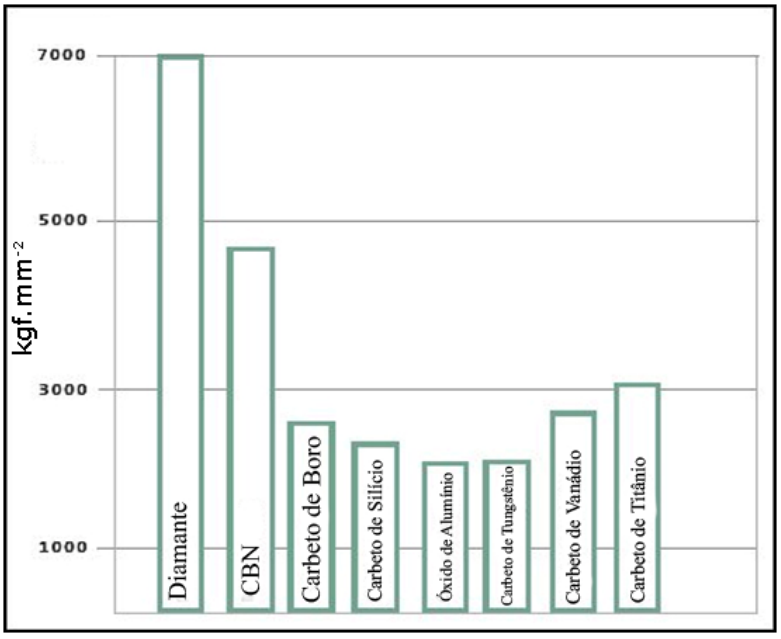

Figura 6 - Dureza Knoop para diferentes abrasivos (WINTER, 2009)

Os principais abrasivos sintéticos empregados na composição das lixas são: óxido de alumínio e o carbeto de silício. O óxido de alumínio possui uma dureza Knoop em torno de 2100 $kgf.mm^{-2}$, baixa condutividade térmica, o que é uma desvantagem para dissipar o calor no lixamento, elevada resistência à ruptura e, por isso, tem grande aceitação na aplicação de lixamento que requer altas pressões. O carbeto de silício tem elevada dureza situada entre o óxido de alumíno e o diamante na escala Knoop. Sua dureza situa-se em torno de 2450 e 3000 $kgf.mm^{-2}$. Têm alta condutividade térmica, boas características de fratura. Embora o carbeto de silício seja o mais frágil 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 contém revestimentos de resina.

Segundo Stemmer (1992) as dimensões dos grãos e sua uniformidade são uma característica importante no processo de usinagem com abrasivos. A classificação mais usual que padroniza os tamanhos dos grãos é da norma ANSI Standard B 74.12, que específica o tamanho dos grãos em mesh. A medida mesh é representada por um número que corresponde à quantidade de fios por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos no processo de seleção. Quanto maior o número menor serão os grãos e quanto menor o número maior serão os grãos. O esquema das peneiras para essa classificação em mesh pode ser observado na Figura 7.

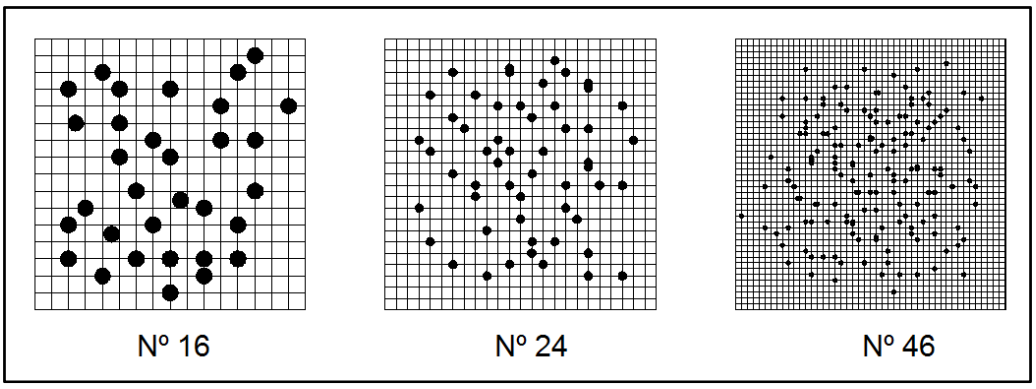

Figura 7 - Esquema da classificação mesh para os grãos abrasivos

A Tabela 1 apresenta uma proposta de classificação para diferentes granulometrias e suas aplicações no lixamento da madeira. Deve-se ficar atento para a seqüência de uso de cada número de lixa. A granulometria seguinte não pode exceder mais que 50% do grão usado anteriormente. Caso para o lixamento utilizou-se uma granulometria número 80 mesh, a próxima lixa deverá ter 50% a mais de 80 mesh, isto é, 120 mesh. Esta é a condição adequada para o grão mais fino remover o risco deixado pelo grão mais grosso.

Tabela 1- Aplicações dos abrasivos em função da granulometria (HAWKS, 1995)

Granulometria (mesh)	Classificação	Aplicações
600–500	Super fina	Polimento
400–360–320	Extrafina	Lixamento que antecede a aplicação de revestimento
280–224–220	Muito fina	Lixamento entre os cantos e último lixamento para madeiras duras
180–150	Fina	Último lixamento de madeira macia e primeiro para madeira dura
120–100–80	Média	Lixamento preliminar
60–50–40	Grossa	Remoção de tinta ou falhas grosseiras

Além da importância do conhecimento do tipo de abrasivo e suas características para cada aplicação é importante saber que existem duas formas em que esses abrasivos são distribuídos sobre a lixa, podendo ser do tipo camada aberta ou fechada. Na camada aberta existe uma menor quantidade de grãos por unidade de área, onde os grãos abrasivos recobrem a superfície da lixa em torno de 50 a 70% aproximadamente, e tem como característica uma maior quantidade de arestas cortante por unidade de área, maior flexibilidade, maior remoção de material e maior resistência ao empastamento (adesão do material ao grão abrasivo). É indicada para evitar a incrustação (empastamento) em operações com madeiras com certos tipos de extrativos (resinas). Para camada fechada existe uma maior quantidade de grãos por

unidade de área, ou seja, os grãos abrasivos recobrem totalmente a superfície da lixa e seus benefícios são atribuídos a uma maior quantidade de arestas cortantes por unidade de área. É indicada para operações de acabamento e para lixas de grãos finos, oferecendo uniformidade no acabamento final.

- MATERIAL DE APOIO DAS LIXAS (COSTADO)

Segundo Nussbaum (1988) materiais para os suportes ou bases sobre as quais são aplicados os abrasivos podem ser classificados em: papel de alta resistência**,** tecido de algodão, combinação de papel de alto peso e tecido, combinação de fibra e fibra vulcanizada**.** Existe uma classificação para os costados de papel que relaciona uma letra com suas características como flexibilidade, resistência etc., sendo essas características em função da gramatura do papel. A Tabela 2 exemplifica essa codificação. Da mesma forma existem letras designadas para os diferentes tipos de costados de tecido. A Tabela 3 exemplifica essas codificações para os principais tecidos utilizados.

O costado de fibra é constituído de aglomerado de papel vulcanizado e fibras de algodão. Esse possui a maior resistência entre os costados, sendo utilizado em operações que exigem grandes esforços. Sua aplicação mais usual é em discos para lixadeira portátil. O costado combinado é obtido através da colagem de papel pesado e tecido (forro). Possui resistência intermediária entre o tecido e a fibra, sendo utilizada nas indústrias madeireiras em operações pesadas, e para o lixamento de assoalhos (NORTON, 2003).

Tabela 2 - Codificação utilizada para costado e papel (NORTON, 2003)

Cód.	Gramatura $g.cm^{-2}$	Características	Aplicações
A	70	Flexível e leve	Operações manuais e em lixadeiras portáteis, a seco ou refrigeradas
B	90		
C	110	Flexível e resistente	
D	150		
E	220	Pesado	Operações mecanizadas em geral (desbaste e acabamento)
F	280	Pesado	

Tabela 3 - Classificação e características para o costado de tecido (NORTON, 2003)

Classificação dos tecidos		
Cód.	Tipo de tecido	Características
L	Lonita	É o mais leve de todos, possui média resistência e flexibilidade. É utilizado em folhas ou combinação com papel.
J	Jeans	Leve e flexível, é mais resistente que a lonita. É empregado em lixas que não sofrem grandes esforços mecânicos e que necessitam de grande flexibilidade.
X	Drill	Encorpado (mais pesado) e resistente, ideal para operações mecânicas em geral.
S	Cetim	É mais resistente que o drills, sendo indicado para operações severas (desbaste pesado).
Y	Poliéster	É robusto e mais resistente à ruptura longitudinal que o cetim algodão. Utilizado em operações severas, a seco ou refrigeradas.

- ADESIVO DE LIGAÇÃO DOS ABRASIVOS

Segundo Nussbaum (1988) os adesivos ou colas utilizados para a fixação dos abrasivos no costado podem ser de cola de origem animal, origem animal mais carbonato de cálcio, resina fenólica e resinas especiais para papel **(**resistente a água**).** Onde para cada tipo de adesivo existem suas aplicações como alta resistência e flexibilidade, resistência ao calor, operações com presença de umidade, entre outras aplicações.

- TIPOS DE EMENDAS PARA LIXAS

Segundo o informativo técnico da empresa NORTON (2003) a escolha do tipo de emenda ideal para operação de lixamento é fundamental para o sucesso na aplicação da lixa. Essa escolha depende de fatores como tipo de costado da lixa, granulometria, tipo de material a ser lixado, tipo de operação etc. A seguir serão apresentados os principais tipos de emendas e suas aplicações.

Emenda sobreposta sem raspagem do grão: Ideal para lixas com costado de papel para lixamento de madeira. É utilizada também em cintas com costado de pano. Deve-se observar o sentido de giro, conforme seta apresentada no costado. A Figura 8 ilustra esse tipo de emenda.

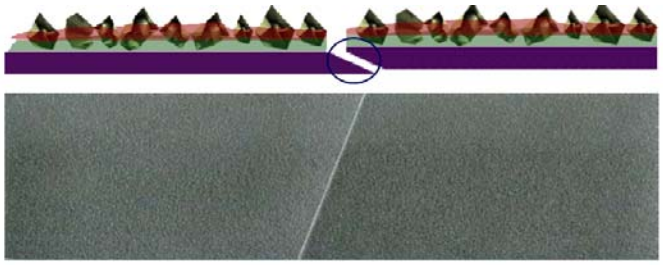

Figura 8 - Emenda sobreposta sem raspagem dos grãos (NORTON, 2003)

Emenda sobreposta com média raspagem do grão: Utilizadas em operações que geram calor, possuindo a vantagem de se auto-refrigerar. Também se deve observar o sentido de giro da cinta. A Figura 9 ilustra esse tipo de emenda.

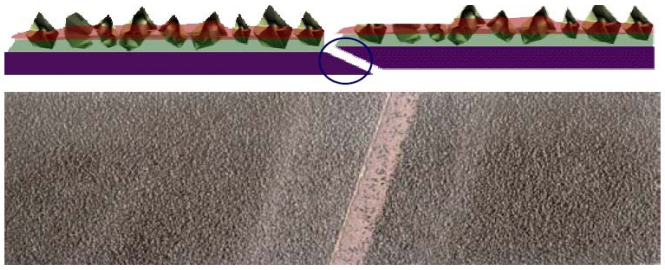

Figura 9 - Emenda sobreposta com média raspagem dos grãos (NORTON, 2003)

Emenda sobreposta com total raspagem do grão e remoção do adesivo: Utilizadas em operações de acabamento (lixas com grãos finos). Observar o sentido de giro da cinta. A Figura 10 ilustra esse tipo de emenda.

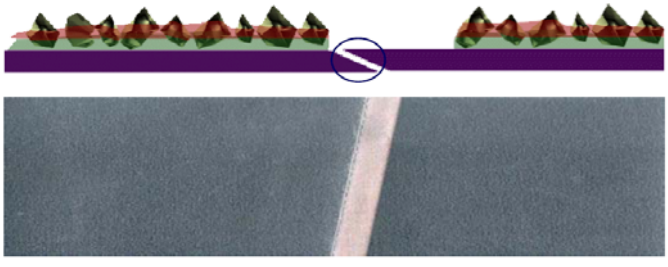

Figura 10 - Emenda sobreposta com total raspagem dos grãos e remoção do adesivo (NORTON, 2003)

Emenda de topo construída com filme de poliéster super resistente no costado: Utilizadas em operações de alta remoção de material, principalmente em lixas para metalurgia. Não tem sentido de giro a ser observado. A Figura 11 ilustra esse tipo de emenda.

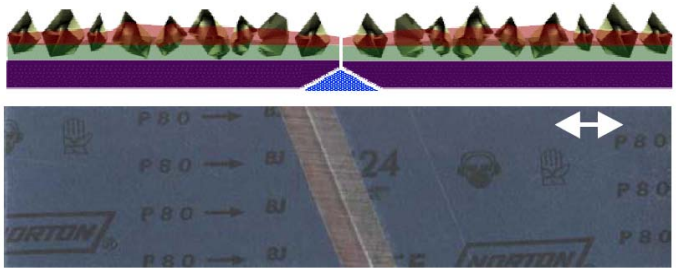

Figura 11 - Emenda de topo construído com filme no costado (NORTON, 2003)

Emenda de topo em forma senoidal com filme de poliéster super resistente no costado: Oferece alta resistência a dobra e à fadiga de emenda. Permite uma melhor conformação com a roda de contato e a peça obra. Aplica-se principalmente em lixas para metalurgia. Não tem sentido de giro a ser observado. A Figura 12 ilustra esse tipo de emenda.

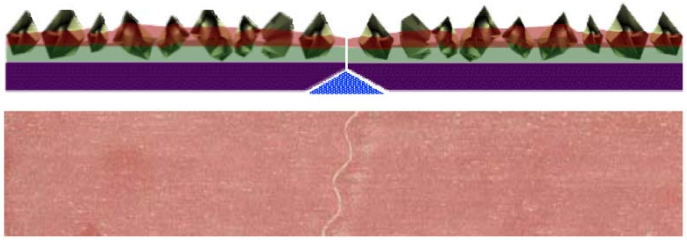

Figura 12 - Emenda de topo em forma senoidal construído com filme no costado (NORTON, 2003)

Emenda sobre topo: Emenda de topo construído com o filme de poliéster no lado que contém a camada abrasiva. Aplica-se principalmente em lixas para madeira em operações de lixamento com patim. Utilizada também em operações mais severas em metalurgia. Não necessita observar o sentido de giro. A Figura 13 ilustra esse tipo de emenda.

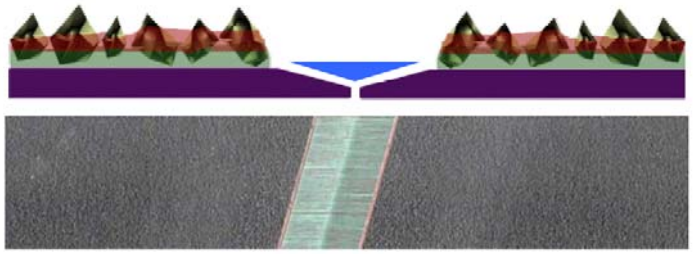

Figura 13 - Emenda sobre topo construída com filme (NORTON, 2003)

De acordo com a NORTON (2003) existem outros fatores que influenciam no sucesso da emenda, como por exemplo, o ângulo adequado da emenda, condições de armazenamento da lixa, tipo de adesivo etc.

3.1.3 Acabamento superficial

Segundo Moura & Hernández (2006) o lixamento é o método mais comum utilizado para o acabamento de superfícies de madeiras que precede as aplicações de revestimentos. O principal objetivo do lixamento é produzir superfícies livres de defeitos visuais bem como fazer uma superfície que absorva uniformemente os revestimentos aplicados sobre a madeira.

Segundo Lemaster (2004) a textura de uma superfície de forma tridimensional, é descrita como a topografia, rugosidade, ou irregularidades de uma interface entre uma substância e seu entorno. A rugosidade de uma superfície inclui pequenas irregularidades (pequenos comprimentos de onda) onde são resultados do processo em que foi gerado ou condições do material.

De acordo com Lemaster (2004) a rugosidade e a topografia de uma superfície são propriedades importantes dos materiais para o funcionamento e desempenho dos mesmos na engenharia e servem como parâmetro quantitativo da qualidade da superfície podendo ser utilizados para o controle do processo. O tipo de textura de uma superfície pode ser devido às características próprias do material, a forma na qual esse material foi processado ou a combinação de ambas. As características do processo que afetam na textura da superfície incluem: a falta de precisão nas ferramentas, deformações geradas devido à força de corte, vibração da ferramenta ou peça usinada,

geometria da ferramenta de corte, efeito de tratamentos térmicos etc. As características da madeira que podem afetar na textura incluem: espécie de madeira, densidade, umidade, direção de corte, anatomia etc.

Para Carpinetti *et al.* (1996) a textura ou rugosidade superficial caracteriza-se pelas micros-irregularidades geométricas deixadas na superfície do material trabalhado decorrentes do processo de fabricação.

Segundo Agostinho (1977) as superfícies reais distinguem-se das superfícies geométricas através das diferenças de forma, sejam elas macro ou microgeométricas. A diferença de forma é definida como a totalidade de todas as diferenças da superfície real com relação à superfície ideal geométrica.

Ao se examinar uma superfície, distinguem-se diferenças mais grossas e diferenças mais finas. Maldonado (1998) cita seis níveis de irregularidades de forma e de estado de uma superfície usinada, podendo ser de 1ª ordem, diferenças conhecidas como desigualdade e ovalização, cilindricidade. Essas diferenças de forma, por serem determinados por instrumentos normais de medição, não são previstas como desvios de rugosidade superficial. De 2ª ordem, que caracteriza as ondulações de um perfil, de caráter periódico devido às vibrações de baixas freqüências da peça ou da ferramenta. Como será visto a rugosidade pode ser considerada superposta a uma superfície ondulada. Diferenças de 3ª e 4ª ordens, a rugosidade em si, regular ou de alta freqüência, decorrente do avanço, da geometria e qualidade de afiação da ferramenta, e do material. As diferenças de 5ª e 6ª ordens, dependem da estrutura físico-química, além do domínio da metrologia.

As diferenças de forma de 2ª a 5ª ordens sobrepõem-se compondo o perfil da rugosidade superficial. A rugosidade superficial é definida como a soma das diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens, que resultam da ação inerente ao processo de usinagem (AGOSTINHO *et al.*, 1977). De acordo com Carpinetti *et al.* (1996) a rugosidade de uma superfície é basicamente quantificada através de parâmetros relacionados a altura (amplitude) e largura (ou espaçamento) das irregularidades, ou uma combinação desses atributos. Parâmetros comumente usados são: Rugosidade média Ra (*roughness average*), rugosidade média quadrática Rq (*RMS roughness*), Rt (máxima distância

pico a vale), Sm (média das distâncias entre saliências), tp (fração de contato), Δa (médias da inclinação das irregularidades do perfil), entre outros.

Segundo Tiburcio (2009) para avaliação desses níveis de irregularidades, existem inúmeras técnicas de medição, tais como: apalpamento mecânico, técnicas ópticas paramétricas (perfilometria e interferometria) e não-paramétricas (dispersão de luz), microscopia, emissão acústica, ultra-som, técnica pneumática e de capacitância.

Os principais parâmetros e critérios para avaliação da rugosidade voltados para o apalpamento mecânico são padronizados pelas normas NBR ISO 4287/2002, NBR ISO 4288/2008 e NBR 6405/1988. O primeiro parâmetro a ser definido para o apalpamento mecânico corresponde ao comprimento de amostragem, indicado na Figura 14 por L_e ("*cut-off*"), que corresponde a segmentos dentro do comprimento de medição, indicado na Figura 14 por L_m, sobre os quais se calculam os parâmetros estatísticos quantitativos dos erros de rugosidade. A rugosidade da superfície é avaliada pela média aritmética de uma serie de segmentos consecutivos (comprimento de amostragem), que definem o comprimento de medição (CARPINETTI *et al.*,1996). A norma NBR 6405/1988 e a ISO padronizaram que o comprimento de medição realizado pelos rugosímetros seja no mínimo, cinco comprimentos amostrais.

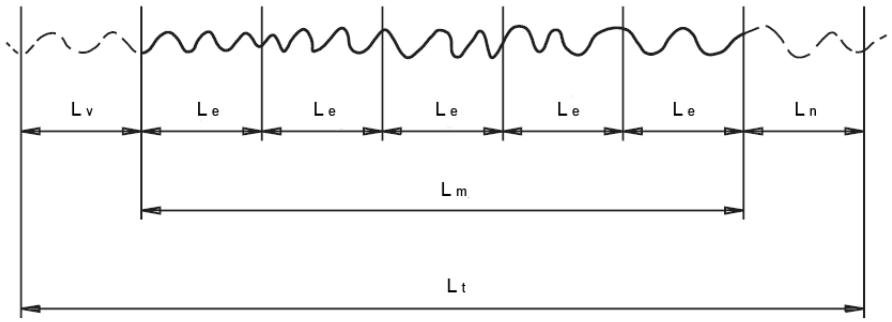

Figura 14 - Comprimento para avaliação da rugosidade (NBR 6405/1988)

O comprimento de amostragem é definido com base no comprimento das ondulações correspondentes à rugosidade, e tem por objetivo revelar a rugosidade da superfície. De outro modo não é possível ser identificada devido às maiores amplitudes das ondulações secundárias ou erros de forma da superfície (CARPINETTI *et al.*,1996). A Figura 15 ilustra essa filtragem realizada através do comprimento de

amostragem. Pode-se observar na Figura 15 a remoção da ondulação existente no primeiro gráfico (A) permanecendo apenas a rugosidade (B).

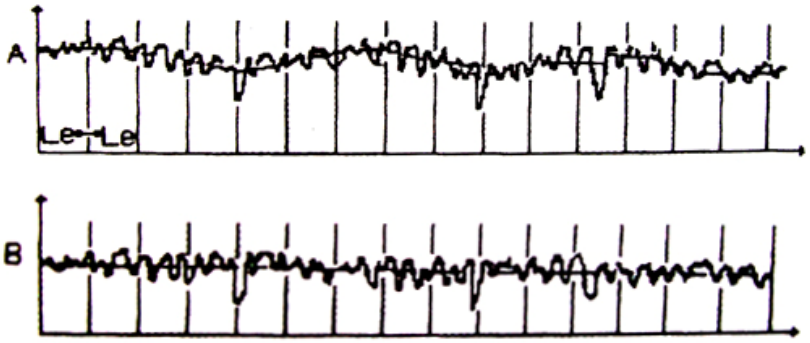

Figura 15 - Comprimento de amostragem (adaptado de NOVASKI, 1994)

O comprimento de onda limite λ_c (*"cut-off"*) equivale ao comprimento de amostragem (Figura 14 parâmetro L_e), sendo que os aparelhos rugosímetros apresentam esses comprimentos limites padronizados pela norma NBR 6405/1988 ou pela ISO, existindo os seguintes comprimentos de onda: 0,08, 0,25, 0,8 e 2,5mm. Dessa maneira, através da utilização de filtros com diferentes comprimentos de onda limite, o comprimento de onda limite mais adequado para a superfície pode ser selecionado. Entretanto, o filtro somente deve ser selecionado após a consideração sobre a natureza da textura e quais características são mais importantes (CARPINETTI *et al.*, 1996). A norma NBR 6405/1988 e a NBR ISO 4288/2008 dispõem de tabelas para a seleção do comprimento de onda limite (λ_c) de acordo com diversos parâmetros que são estimados a partir do processo de fabricação em que a peça foi submetida.

Outro parâmetro definido para o apalpamento mecânico corresponde ao sistema de medição da rugosidade. Dois sistemas básicos de medida são usados nos diversos países: o da linha média (M) e o da envolvente (E). O sistema da linha média é o mais utilizado, porém em alguns países são padronizados ambos os sistemas (AGOSTINHO *et al.*, 1977). A norma NBR 6405/1988 adota, para o Brasil, o sistema da linha média.

No sistema da linha média, ou sistema M, todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas a partir do conceito de linha média, ou seja, linha paralela a direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil, seja igual à soma das áreas

inferiores, no comprimento de amostragem L_e (AGOSTINHO *et al.*, 1977). A Figura 16 exemplifica a linha média em um perfil de rugosidade.

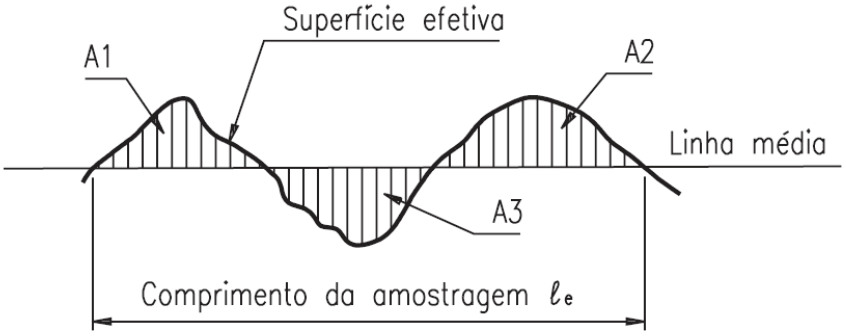

Figura 16 - Linha média para um perfil de rugosidade (TIBURCIO, 2009)

Como explicado no parágrafo anterior, à soma das áreas A1 e A2 (Figura 16) é igual à área A3. Segundo Agostinho *et al.* (1977) os sistemas de medição de rugosidade, baseados na linha média podem ser agrupados em três classes: os que se baseiam na medida da profundidade da rugosidade, os que se baseiam em medidas horizontais e os que se baseiam em medidas proporcionais.

Os principais parâmetros utilizados para medida da profundidade na rugosidade, empregados na avaliação do estado da superfície no lixamento, correspondem ao desvio médio aritmético (R_a) e o desvio médio quadrático (R_q). A seguir serão descritos esses parâmetros e suas expressões para obtenção da rugosidade.

- Desvio médio aritmético ou rugosidade média (R_a)

Corresponde média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem (Figura 17). A Equação (1) demonstra como é calculado o valor de R_a. Segundo Agostinho *et al.* (1977) o valor de R_a por ser uma média aritmética, não representa um indicação direta do estado da superfície, porém pode ser facilmente medida por processos gráficos ou elétricos.

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |z|dx \cong \frac{1}{n}\ \sum_{i=1}^{n}|z_i| \qquad (1)$$

- Desvio médio quadrático (R_q)

Definido como raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média em um comprimento de amostragem (Figura 17). A Equação (2) demonstra a forma que é calculada o valor de R_q. Segundo Agostinho *et al.* (1977) a elevação ao quadrado aumenta mais o efeito da irregularidade que se afasta da média, onde o valor de Rq é cerca de 11% maior que o valor de Ra, e essa diferença passa ser importante em muitos casos. De acordo com Carpinetti *et al.* (1996) o valor R_q também indica a amplitude média das irregularidades da superfície. Entretanto, quando comparado com R_a, o valor R_q é mais sensível a picos e vales, ou seja, as amplitudes maiores, quando elevadas ao quadrado, terão um peso maior no cálculo da média das amplitudes.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L z^2 dx} \cong \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{z_i^2}{n}} \quad (2)$$

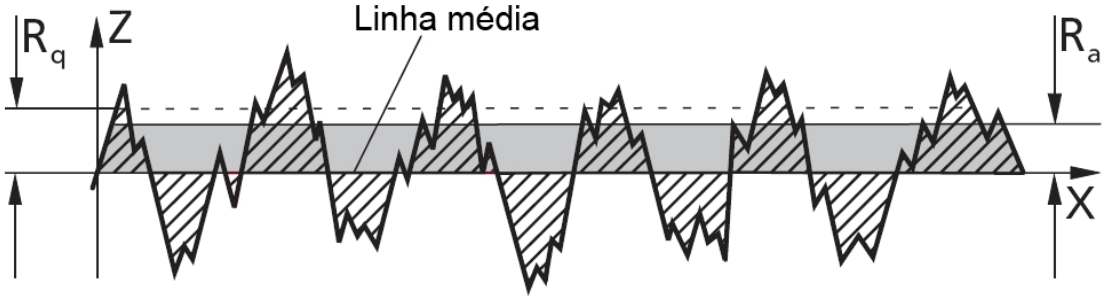

Figura 17 - Rugosidade média (R_a) e desvio médio quadrático (R_q) (adaptado de MAHR, 2010)

4 MATERIAIS E MÉTODO

Nos próximos Itens serão descritos os procedimentos e materiais utilizados na realização do trabalho com intuito de esclarecer a forma com que a pesquisa foi conduzida.

4.1 Matéria-prima e preparação dos corpos de prova

Utilizou-se uma única árvore da espécie de *Pinus elliottii* no presente estudo provinda de floresta plantada da região Sudeste do estado São Paulo com idade aproximada de 40 anos e um diâmetro altura do peito (DAP) aproximado de 50 cm.

Os corpos de prova foram fabricados no Laboratório de Processamento da Madeira no *Campus* Experimental da UNESP de Itapeva. As condições de preparação dos corpos de prova foram idênticas de maneira a não influenciar no processo de lixamento. Os corpos de prova foram preparados em duas etapas, descritas a seguir:

1ª Etapa - desdobro primário e secundário da tora

Realizou-se um desdobro primário da tora de *Pinus elliotti* em uma serra de fita geminada da marca FaberNew retirando-se um semi-bloco. Em seguida, esse semi-bloco foi para um desdobro secundário em uma serra multilâminas da marca FaberNew, modelo CMB 210, onde foram retiradas cinco pranchas com as seguintes dimensões: 3500 x 83 x 250 mm. As cinco pranchas foram enumeradas de 1 a 5 para realização de um sorteio para retirada de duas pranchas. Considerou-se que o sorteio de duas pranchas foi suficiente para representar a variabilidade das propriedades da madeira ao longo da seção transversal e longitudinal da tora para retirada das amostras, assim obtendo-se peças com maior variabilidade. Das duas pranchas sorteadas, foram confeccionados seis peças em uma resserra da marca FaberNew com as seguintes dimensões: 3500 x 83 x 60 mm. Destas seis, confeccionaram-se mais doze peças com as seguintes dimensões: 1000 x 30 x 60 mm. Essas peças foram armazenas durante um período de tempo para que a madeira entrasse em equilíbrio com ambiente, por volta

de 15% de umidade de equilíbrio (UE). Os procedimentos descritos acima, bem como o esquema que foi realizado a 1ª etapa de preparação dos corpos de prova estão representados nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

Figura 18 - Procedimentos realizados na primeira etapa do desdobro inicial

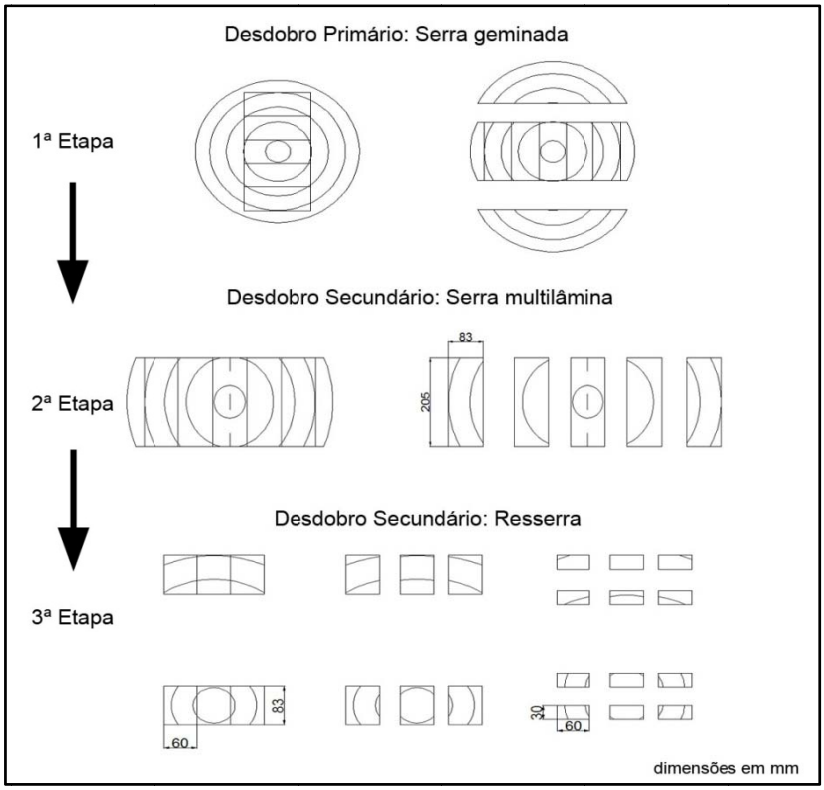

Figura 19 - Esquema da primeira etapa de preparação dos corpos de prova

2ª Etapa - dimensões finais e climatização dos corpos de prova

Nessa etapa as peças de *Pinus elliottii* com dimensões de 1000 x 30 x 60 mm foram aplainadas em duas faces de referência em uma plaina da marca ROCCO modelo PMS 350, reduzidas nas dimensões (largura e espessura) em uma desengrossadeira da marca BALDAN modelo DGR4 e cortadas em uma esquadrejadeira da marca VERRY modelo LIFE nas dimensões finais. Os processos de usinagem realizados na segunda etapa são ilustrados na Figura 20. Os corpos de prova foram preparados para que o lixamento procedesse na direção paralela às fibras com os planos de corte (tangencial e radial) aleatoriamente distribuídos. Preparou-se um total de 800 corpos de prova, os quais foram enumerados e devidamente climatizados de acordo com a norma NBR 07190/1997 para "classe de umidade 1 - 12% UE" em uma câmara climática da marca TECNAL modelo TE 4001 (Figura 21). As dimensões finais dos corpos de prova foram 30 x 54 x 23 mm (Figura 22).

Figura 20 - Processo de preparação dos corpos de prova

Figura 21 - Enumeração e climatização dos corpos de prova

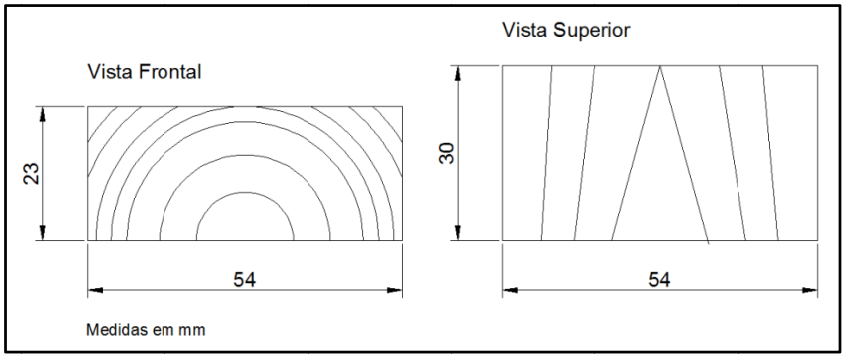

Figura 22 - Dimensões ideais do corpo de prova

Após a climatização dos corpos de prova, os mesmos foram acondicionados em sacos de polietileno lacrados para não ocorrer variação da umidade (Figura 23).

Figura 23 - Amostras acondicionadas com teor de umidade de 12% UE

4.2 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi realizado através do método gravimétrico da seguinte forma: determinou-se a massa inicial (m_i) do corpo de prova com precisão de 0,01 g. Após a determinação da massa inicial, colocou-se o corpo de prova na câmara de secagem, com temperatura máxima de 103 ± 2°C. Durante a secagem a massa do corpo de prova foi medida a cada 6 horas, até que a variação, entre duas medidas consecutivas fosse menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Esta massa foi considerada como a massa seca (m_s). Conhecida a massa seca (m_s) do corpo de prova, determinou-se a umidade à base seca de acordo com a Equação (3). Esta determinação

foi realizada de acordo com a norma NBR 07190 para comprovação que a madeira entrou em equilíbrio com ambiente em aproximadamente 12% UE.

$$U_{(\%)} = \frac{(m_i - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde: $U_{(\%)}$ = porcentagem de umidade base seca;

m_i = massa de amostra úmida, em gramas;

m_s = massa de amostra seca, em gramas.

4.3 Análise física da madeira

A seguir serão apresentados os procedimentos utilizados para determinação da densidade aparente e básica da madeira de *Pinus elliottii*.

4.3.1 Determinação da densidade aparente

A densidade aparente foi determinada segundo a norma NBR 07190. O procedimento consiste em pesar a massa do corpo de prova em uma balança com precisão de 0,01 g e medir o seu volume. Para medição do volume do corpo de prova utilizou-se um paquímetro mecânico da marca Mitutoyo com precisão de 0,05mm. A densidade aparente (D_{ap}) é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume do corpo de prova com teor de umidade de 12% (UE), sendo dada pela Equação (4).

$$D_{ap_{(12\%)}} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (4)$$

Onde: $D_{ap\,(12\%)}$ = densidade da madeira a 12% de umidade, kg.m^{-3};

$m_{\,12\%}$ = massa de amostra a 12% de umidade, em kg;

$V_{12\%}$ = volume da amostra a 12% de umidade, em m^3.

4.3.2 Determinação da densidade básica

A densidade básica da madeira é definida como a relação entre o peso de uma amostra seca em estufa e o seu volume verde ou saturado de água. Essa determinação seguiu o método da balança hidrostática, segundo norma NBR 07190. Os corpos de prova foram acondicionados em uma caixa com água até a sua saturação completa. Após a saturação, pesaram-se as amostras imersas (m_{im}) em uma balança hidrostática com precisão de 0,01g. Removeu-se a água superficial dos corpos de prova, e pesaram-se as amostras saturadas (m_{v}) na mesma balança. Em seguida, secaram-se os corpos de prova com temperatura máxima de 103 ± 2°C, até que a variação, entre duas medidas consecutivas, fosse menor ou igual a 0,5% da última massa medida, obtendo-se a massa seca (m_{s}). A densidade básica foi determinada através da Equação (5).

$$D_b = \left(\frac{m_s}{m_v - m_{im}}\right) \times D_a \qquad (5)$$

Onde: D_b = densidade básica, kg.m^{-3};

m_{s} = massa de amostra seca, em kg;

m_{v} = massa de amostra saturada em água, em kg;

m_{i} = massa de amostra saturada imersa em água, em kg;

D_a = densidade a água a 25ºC.

4.4 Lixamento dos corpos de prova

A seguir serão descritos os componentes do banco de ensaio de lixamento, os valores das variáveis predefinidas do processo de lixamento, os métodos de cálculo empregados para obtenção dos valores das variáveis mensuradas, a forma de

acondicionamento dos abrasivos e o planejamento experimental estabelecido para execução do experimento.

4.4.1 Descrição do banco de ensaio

O banco de ensaio é composto por uma lixadeira plana com um suporte projetado para fixação do corpo de prova e adição de massas para pressão, exaustor para captação do pó, sistema de monitoramento e aquisição de dados composto por um painel de controle, sensores, transdutores, microcomputadores, placas, conectores, cabos e software para aquisição e manipulação dos dados. A seguir serão descritos todas as características dos componentes pertencentes ao banco de ensaios.

- Lixadeira com suporte projetado

Utilizou-se a lixadeira plana da marca BALDAN®, modelo LFH-2. As características técnicas da lixadeira plana estão descritas na Tabela 4 . O suporte para fixação do corpo de prova e adição de massas para pressão foi fabricado em aço ABNT 1010. O esquema do projeto com as dimensões do suporte e a lixadeira plana com o suporte adaptado para fixação do corpo de prova estão ilustrados nas Figuras 24 e 25 respectivamente.

Tabela 4 - Características técnicas da lixadeira plana

Características técnicas do equipamento	
Dimensões da mesa	530 x 160 mm
Diâmetro do disco de lixa	250 mm
Rotação do disco de lixa	2580 rpm
Inclinação da mesa do disco	45º
Dimensão da fita de lixa	1480 x 150 mm
Posição de trabalho	0-90º
Potência do motor	1 CV
Peso líquido aproximado	78 kg

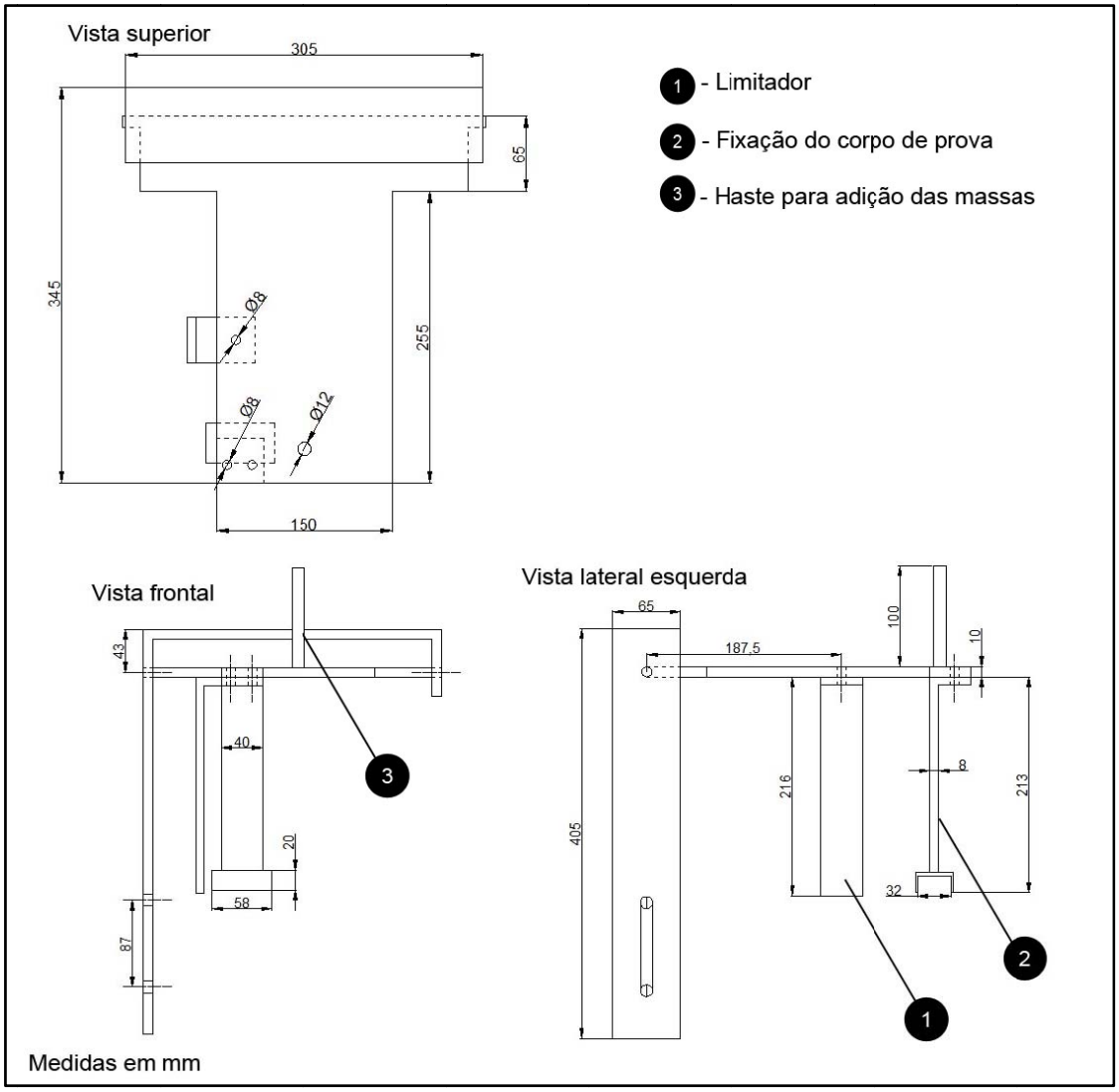

Figura 24 - Esquema das dimensões do suporte adaptado na lixadeira plana

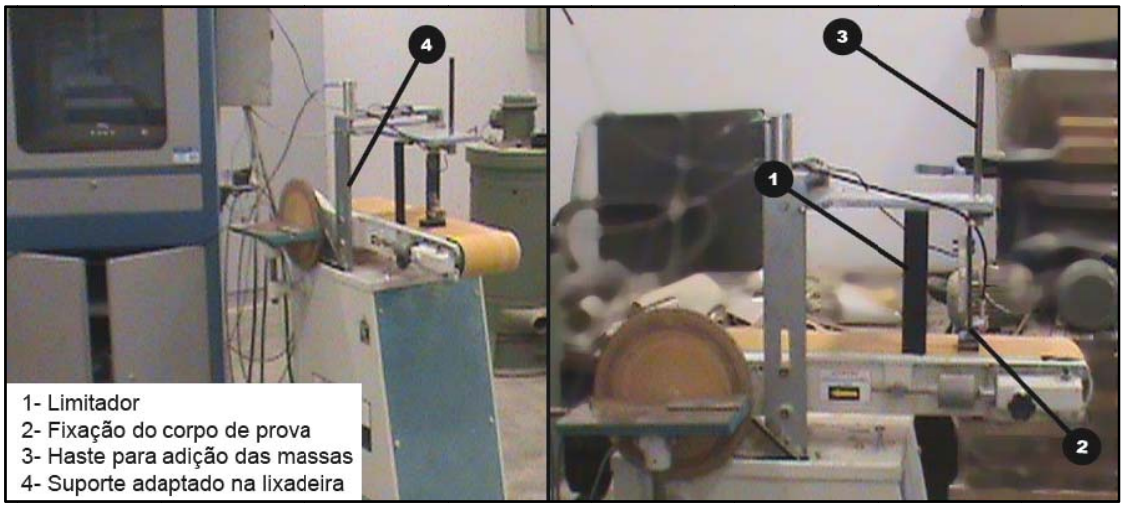

Figura 25 - Lixadeira plana com suporte adaptado

- Sistema de monitoramento e aquisição de dados

O sistema de monitoramento e aquisição de dados é composto pelos seguintes componentes:

-Célula de carga para captação da força de lixamento da marca BERMAN load cells©, modelo TBSPL com capacidade de 250 N. Os dados com algumas características técnicas da célula constam na Tabela 5. O formato da célula de carga é ilustrado na Figura 26.

Tabela 5 - Características técnicas da célula de carga modelo TBSPL

Características técnicas	
Capacidade máxima	250 N
Dimensão máxima da plataforma	350 x 350 mm
Torque de aperto	10 N.m
Sensitividade	2,0 ± 0,2 mV/V
Grau de proteção	IP 65
Resistência elétrica de entrada	410 ± 2 Ω
Resistência elétrica de saída	350 ± 3 Ω
Faixa de temperatura nominal	-20 até +60ºC
Limite de carga de segurança	Até 150% da capacidade nominal
Tensão recomendada de excitação	10 VCC
Tensão máxima de excitação	15 VCC
Material	Alumínio

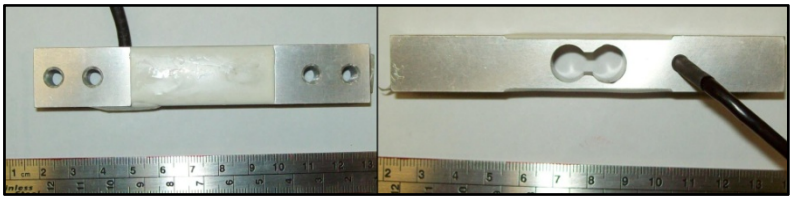

Figura 26 - Célula de carga modelo TBSPL

-Módulo de emissão acústica composto por um sensor de emissão acústica (piezoelétrico) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (Root Mean Square), marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A, modelo do amplificador de sinal 1272-1000. As características técnicas do módulo de emissão acústica estão apresentadas na Tabela 6. O módulo de emissão acústica utilizado no experimento pode ser observado na Figura 27.

Tabela 6 - Características técnicas do módulo de emissão acústica

Características técnicas do amplificador	
Dimensões do amplificador	190,5 x 63,5 x 35 mm
Tensão de alimentação	28 VCC
Corrente de saída	4 – 20 mA
Faixa de constante disponível RMS	50 – 500 mS
Faixa de constante selecionada RMS	50 mS
Faixa de ganho disponível	0 – 40 dB
Faixa de ganho selecionada	40 dB
Massa do amplificador	350 g
Material do invólucro do sensor	Aço inox
Grau de proteção	IP 54
Freqüência do sensor R15A	150 kHz
Faixa de temperatura nominal	0 até +50 ºC

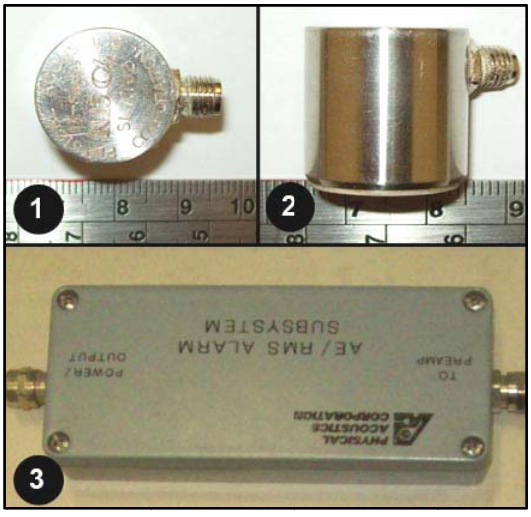

Figura 27- Módulo de emissão acústica, sensor (1) (2) e amplificador (3)

-Transdutor de corrente alternada monofásico para captação da potência consumida do motor durante o lixamento, marca WARD modelo TRX-I/U. As características técnicas do transdutor de corrente alternada constam na Tabela 7. A forma do transdutor de corrente é apresentado na Figura 28.

Tabela 7- Características técnicas do transdutor de corrente TRX-I/U

Características técnicas	
Dimensões	45 x 75 x 110 mm
Tensão de alimentação	24 VCC
Corrente de saída	0 – 20 mA
Tensão de saída	0 – 10VCC
Freqüência nominal	50 – 60 Hz
Tempo de resposta	250 mS
Faixa de temperatura nominal	-5 até +55ºC

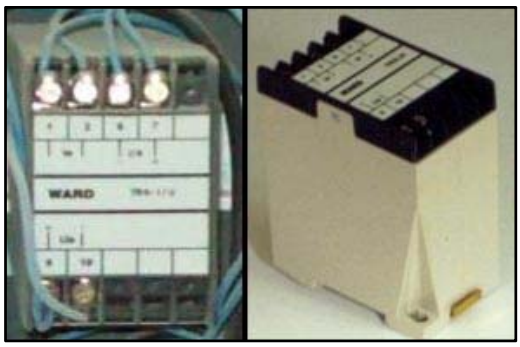

Figura 28 - Transdutor de corrente modelo TRX-I/U

-Amplificador da célula de carga, tem a função de receber o sinal elétrico da célula de carga e amplificá-lo para um valor em voltagem proporcional a deformação da célula, marca BITEC, modelo TCA500. As características técnicas do amplificador da célula de carga estão apresentadas na Tabela 8. O amplificador da célula de carga pode ser vista na Figura 29.

Tabela 8 - Características técnicas do amplificador TCA500

Características técnicas	
Dimensões	23 x 110 x75 mm
Tensão de alimentação	24 VCC
Tensão de entrada	0 – 100 mV
Tensão de saída	0 – 10 VCC

Figura 29 - Amplificador da célula de carga TCA500

-Bloco de conectores e cabo de ligação placa/bloco de conectores, marca National Instruments, modelo do bloco de conectores NI BNC 2120 e modelo do cabo SHC68-EPM (2m) 192061-02. A função do bloco de conectores é realizar a interface entre os sinais analógicos (enviados pelos sensores descritos acima) e digitais do banco de ensaio e enviá-los para uma placa de aquisição de dados. As características técnicas do bloco de conectores NI BNC 2120 constam na Tabela 9.

Tabela 9 - Características técnicas do bloco de conector NI BNC 2120

Características técnicas	
Dimensões	267 x 112 x 59,7 mm
Massa aproximada	1 kg
Conector de E/S	68 pinos tipo macho SCSI-II
Nº de conectores tipo BNC	15
Nº de plugs tipo “screw”	31
Temperatura de operação	0 – 50 ºC

-Placa de aquisição de dados, marca National Instruments, modelo NI PCI 6220. A placa de aquisição de dados tem a função de receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais para ser interpretado pelo software no microcomputador. O software utilizado para captação dos dados adquiridos pelos sensores foi feito no programa LabView® 7.1 da National Instruments, onde foi elaborado um programa para adquirir os dados com uma taxa de aquisição de 400 pontos por segundo em forma de matriz salvando em arquivo de texto. A tela do programa de aquisição feito no software LabView® 7.1 pode ser observada na Figura 30.

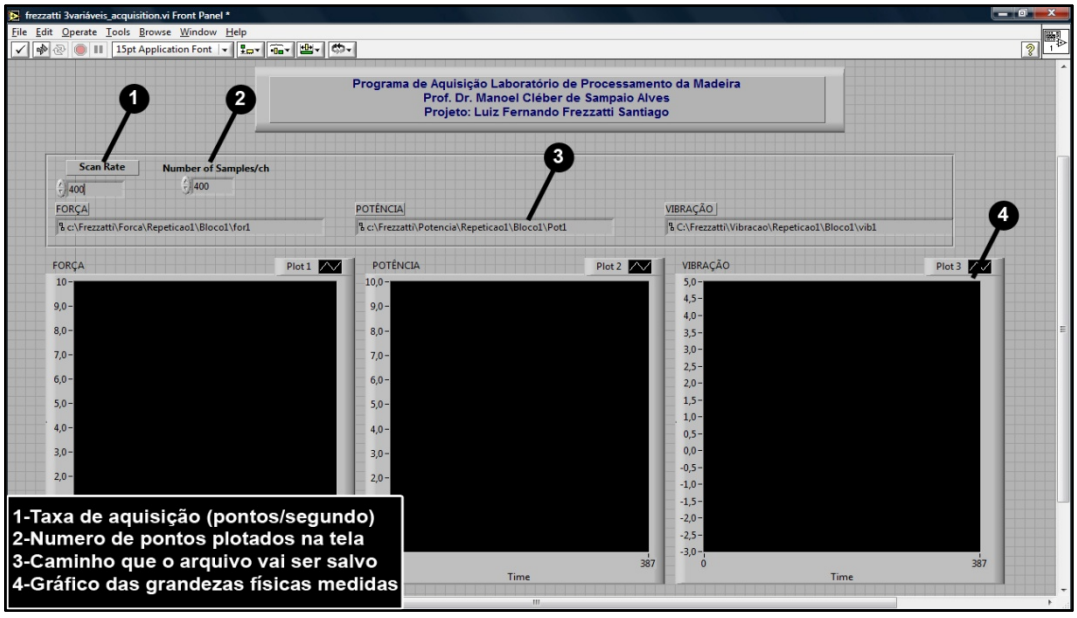

Figura 30 - Programa de aquisição feito no software LabView® 7.1.

-Além dos componentes citados, o sistema de monitoramento e aquisição de dados possui dois microcomputadores para processamento e armazenamento dos dados, uma fonte variável 0 - 30 VCC, com três saídas independentes da marca MINIPA, modelo MPL3303 para alimentação dos módulos de vibração e emissão acústica, um painel elétrico para acionamento da lixadeira e controle do sistema de aquisição, nesse painel existe um inversor de freqüência da marca WEG® modelo µline com tensão de alimentação de 380 V/3A, para o controle da velocidade da lixadeira, além disso, o painel possui uma fonte de alimentação da marca Siemens com entrada 110-220 VCA com saída de 24 VCC para alimentação do amplificador da célula de carga e do

transdutor de corrente. O banco de ensaio com todos os componentes citados nesse tópico pode ser observado na Figura 31.

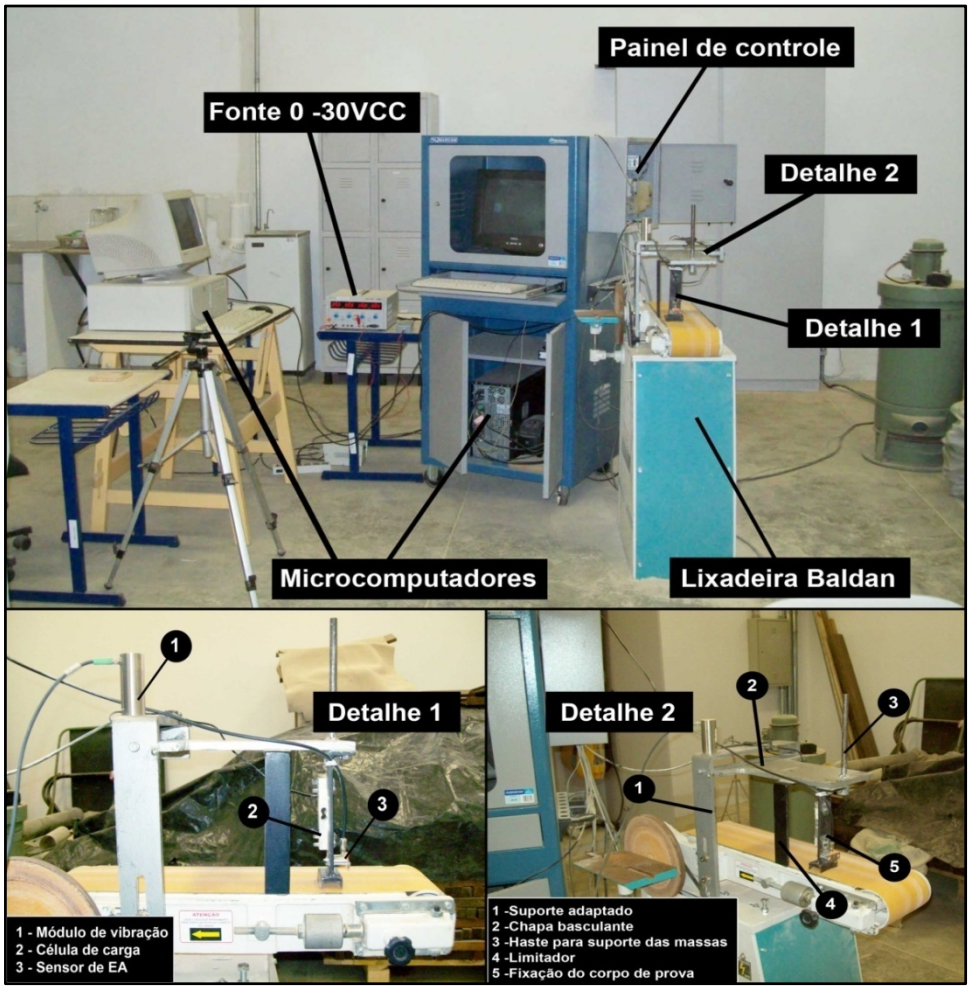

Figura 31 - Banco de ensaio com todos os componentes citados

4.4.2 Acondicionamento dos abrasivos

As lixas utilizadas no experimento foram climatizadas e acondicionadas de acordo com a norma NBR 14960/2003. Colocaram-se as lixas em um armário devidamente climatizado para que se pudessem atender as condições ideais que correspondem: 40 – 50% de umidade relativa com 15 – 29ºC de temperatura ambiente. O abrasivo utilizado no experimento foi o óxido de alumínio. As granulometrias utilizadas correspondem a 80, 100, 120 e 220 mesh produzidas pelo fabricante NORTON abrasivos.

4.4.3 Condições de lixamento pré-estabelecidas

Foram realizados ensaios preliminares de modo a serem verificadas as condições de usinagem que o experimento seria submetido. Nestes ensaios preliminares foram definidos os fatores de entrada do lixamento e seus níveis, sendo os seguintes: Pressão (P_n), Velocidade de corte (V_n) e Granulometria da lixa (G_n). Os níveis dos fatores estabelecidos no experimento apresentam-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Níveis dos fatores variados no experimento

	FATORES			
NÍVEIS	Velocidades de corte ($m.s^{-1}$)			
	V_1	V_2	V_3	
	9	11	13	
	Pressões (kPa)			
	P_1	P_2	P_3	
	26	30	33	
	Granulometrias (mesh)			
	G_1	G_2	G_3	G_4
	80	100	120	220

O restante dos fatores testados foram fixados em um único nível, como a espécie de madeira (*Pinus elliottii*), direção do lixamento (paralelo as fibras), material abrasivo (óxido de alumínio) e o tempo de usinagem. Devido ao grande número de pontos adquiridos por segundo (400 pontos por segundo) e a geração de um arquivo de texto no formato matricial foi necessário criar rotinas de programação para organizar esses dados e eliminar os ruídos provenientes do meio. O software utilizado para realizar esses procedimentos foi o Matlab® 6.5.

4.4.4 Variáveis mensuradas no experimento

Em função da combinação dos níveis dos fatores da Tabela 10 foram mensuradas as seguintes variáveis de saída: potência consumida, força de lixamento, emissão

acústica, taxa de remoção de material, rugosidade superficial, temperatura e análise da integridade superficial. A seguir serão descritos os procedimentos utilizados nos cálculos e equipamentos empregados para essas variáveis.

- Potência consumida no lixamento

A potência consumida foi obtida através de um transdutor de corrente alternada (descrito no Item 4.4.1, p. 63), que em função da corrente elétrica alternada de uma das fases do motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 VCC que é armazenada pelo microcomputador, onde através da Equação (6) o sinal adquirido (em VCC) a uma taxa de 400 pontos por segundo foi transformado na unidade de potência (Watts).

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \tag{6}$$

Onde: P_c = potência consumida, em Watts;

I = corrente alternada de uma das fases, em Ampéres;

U_f = Tensão de uma das fases, em Volts;

F_p = Fator de potência.

Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts é necessário converter o valor de Volts para Ampéres para que se possa aplicar esse valor na Equação (6). O fabricante do transdutor de corrente alternada fornece essa equação para a transformação do dado adquirido em Volts para Ampéres de acordo coma Equação (7).

$$I = \frac{U_{cc}}{2} \tag{7}$$

Onde: I = corrente, em Ampéres;

U_{cc} = Tensão de corrente continua, em Volts.

Substituindo o valor da corrente (Equação (7)), o valor da tensão de fase do motor da lixadeira (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor na Equação (6), têm-se a Equação (8), que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$P_c = \frac{U_{cc}}{2} \times 220 \times 0{,}92 \times \sqrt{3} \quad (8)$$

- Força de lixamento

A força de lixamento foi adquira através do sinal elétrico gerado por uma célula de carga (descrito no Item 4.4.1, p.61). A deformação da célula na zona elástica produz um sinal elétrico proporcional à carga aplicada que corresponde à força de lixamento. Para que fosse possível transformar a grandeza física adquirida em Volts para força em Newton foi necessário calibrar a célula para obtenção de uma equação que relaciona o sinal elétrico com a carga aplicada. As massas aplicadas na célula de carga e o sinal elétrico médio equivalente estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores da calibração da célula de carga

VCC (Volts)	*DP	Massa (g)
0,001	0,00257	0
0,172	0,00147	1731,5
0,208	0,00362	2050,5
0,245	0,00528	2369,9
0,281	0,00751	2690,1
0,317	0,00842	3011,0
0,354	0,00993	3336,9
0,390	0,01016	3658,8
0,423	0,01045	3979,6
0,458	0,01034	4271,2
0,494	0,00950	4594,1
0,529	0,00854	4918,2

*DP – Desvio padrão amostral

Com os dados da Tabela 11 encontrou-se uma correlação linear entre a carga aplicada e o sinal elétrico gerado proporcional, onde através de uma regressão linear calculou-se a equação (Tabela 12) para conversão do sinal elétrico em unidade de força. A Figura 32 ilustra o gráfico obtido através dos parâmetros da Tabela 11. A Equação (9) corresponde à reta obtida através da regressão linear que equivale o valor da força aplicada no lixamento.

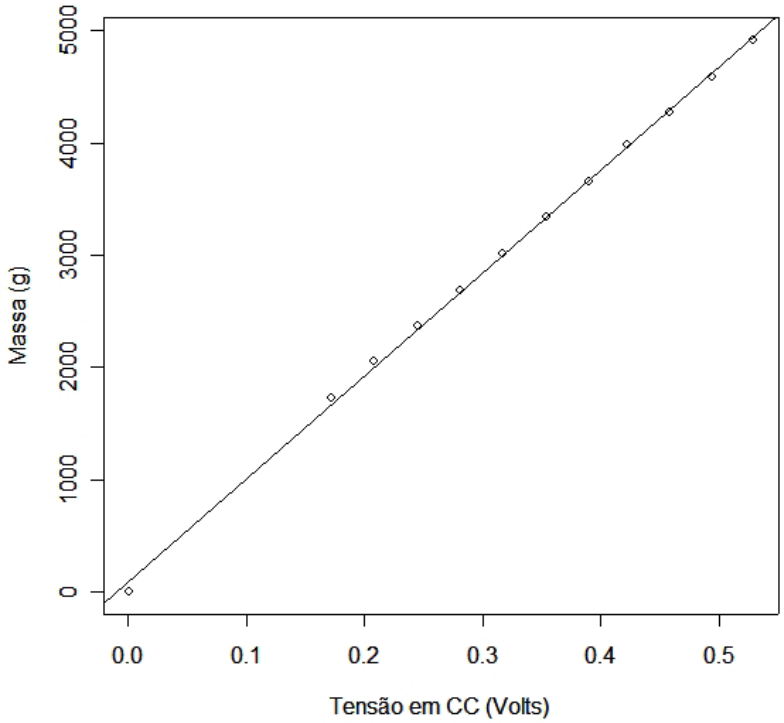

Figura 32 - Regressão linear para força de lixamento

Tabela 12 - Valores da regressão linear para obtenção da força de lixamento

	Intercepto	Inclinação	R^2
Valor	90,3	9175,66	0,999

$$F = ((90{,}3 + 9175{,}66 \times Ucc)/1000) \times 9{,}8 \quad (9)$$

Onde: F = força de lixamento, em Newton;

U_{cc}= Tensão corrente continua, em Volts.

- Emissão acústica (EA)

Para captação da emissão acústica foi utilizado o módulo de emissão acústica que é composto por um sensor (piezoelétrico) e um amplificador de sinal (descrito no Item 4.4.1, p.62). O sinal que saí do amplificador corresponde a um valor em RMS ou valor quadrático médio o qual é um valor retificado do sinal de emissão acústica em intervalos de tempo, e vem sendo amplamente utilizado com sucesso para monitoramento de diversos processos (WEBSTER *et al.*, 1996). Esse sinal elétrico retificado corresponde à unidade VCC e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidades como é o caso da força de lixamento e potência consumida descritos nos Itens anteriores.

- Taxa de Remoção de Material

A taxa de remoção de material corresponde à quantidade de material que é removida no lixamento em relação ao tempo. Para o cálculo desse parâmetro procedeu-se da seguinte forma: Primeiro, pesou-se a amostra com massa inicial (m_i) e teor de umidade de 12% de equilíbrio em uma balança com precisão de 0,01 g. Após isto, registrou-se o tempo de lixamento estabelecido (t_e). Realizado o lixamento, pesou-se novamente a amostra com massa final (m_f). A unidade empregada na taxa de remoção de material corresponde à quantidade de material removida (em volume) por tempo. A Equação (10) mostra expressão que foi utilizada para obtenção desse parâmetro.

$$MRR = \frac{(m_i - m_f)}{t_e \times D_{ap}} \tag{10}$$

Onde: MRR = taxa de remoção de material, em $cm^3.s^{-1}$;

m_i = massa inicial da amostra, em gramas;

m_f = massa final da amostra, em gramas;

t_e = tempo estabelecido para o lixamento, em segundos;

D_{ap} = densidade aparente da amostra, em $g.cm^{-3}$.

O tempo estabelecido (t_e) para o lixamento foi estipulado em função do limitador existente no projeto da haste adaptada na lixadeira (Figura 24). Como as alturas das amostras são as mesmas para todos os ensaios realizados, o tempo estabelecido corresponde à colocação inicial da amostra na lixadeira até o limitador tocar na base da mesma interrompendo o lixamento. Para cada combinação dos níveis dos fatores pré-determinados na Tabela 10 existirá um tempo de lixamento, que é função da pressão aplicada, granulometria e da velocidade de corte. Como o parâmetro medido corresponde à taxa, ou seja, volume de material por tempo, não irá mudar o resultado final para todos os ensaios, pois os tempos estarão devidamente coletados para cada combinação. A forma de coleta do tempo se deu através do programa de aquisição por meio da taxa de aquisição de dados que foi pré-estabelecida para todos os ensaios que corresponde a 400 pontos por segundo. Para cada ensaio foram gravados todos os pontos adquiridos no experimento do início até o fim do ensaio (ponto que o limitador toca a base da lixadeira), sendo possível obter o tempo (em segundos) através da Equação (11) que corresponde o tempo estabelecido de lixamento (t_e).

$$t_e = \frac{N_{TP}}{400} \tag{11}$$

Onde: t_e = tempo estabelecido de lixamento, em segundos;

N_{TP} = número total de pontos coletados nos ensaios.

- Rugosidade superficial

Para medição da rugosidade superficial utilizou-se um rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 25+, de haste de medição com ponta apalpadora cone-esférico de diamante, raio de ponta de 2 μm (Figura 33). Escolheu-se o parâmetro Ra (descrito no Item 3.1.3, p.51) para avaliação do estado da superfície lixada, devido esse parâmetro não ser influenciado por picos e vales provindos da anatomia da madeira que podem distorcer os resultados. O filtro selecionado para o perfil de rugosidade foi o Filtro Gaussiano Robusto. Segundo Gurau *et al.* (2006) o

Filtro Gaussiano Robusto não distorce os dados do perfil de rugosidade quando aparecem pontos muito distantes ao longo do percurso avaliado, que fogem da maior parte, principalmente em superfície não homogênia, que é o caso da madeira, não deixando que esses desvios influenciem no resultado final.

O comprimento de amostragem selecionado (L_e) ou λ_c "*cut-off*" foi baseado no trabalho de Gurau *et al.* (2006), que investigou diferentes comprimentos de amostragem para o material madeira e recomenda um comprimento de amostragem de 2,5 mm para o Filtro Gaussiano Robusto para granulometrias comerciais, que o caso do presente estudo. De acordo com Gurau *et al.* (2006) um comprimento de amostragem de 2,5 mm minimiza as ondulações, que não fazem parte da rugosidade, sem introduzir distorções ou efeito significativo sobre os parâmetros de rugosidade avaliados. Foram estabelecidos seis pontos de medição de rugosidade ao longo da superfície lixada, de forma aleatória para cada amostra. Utilizou-se a média aritmética dos seis pontos como valor representativo da rugosidade da superfície para cada amostra.

Figura 33 - Rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 25+

- Temperatura

Avaliou-se a temperatura entre a face da madeira e a lixa durante o lixamento através de uma câmera infravermelho da marca FLIR SYSTEMS, modelo FLIR i5. A câmera foi posicionada a 90º em relação à lixa e a amostra de madeira a uma distância aproximada de 1 metro. Utilizou-se uma emissividade de 0,95. Para cada combinação

apresentada na Tabela 10 foram tiradas fotos (Figura 34) e coletado através do Software do equipamento a temperatura máxima decorrente da combinação dos níveis dos fatores estabelecidos.

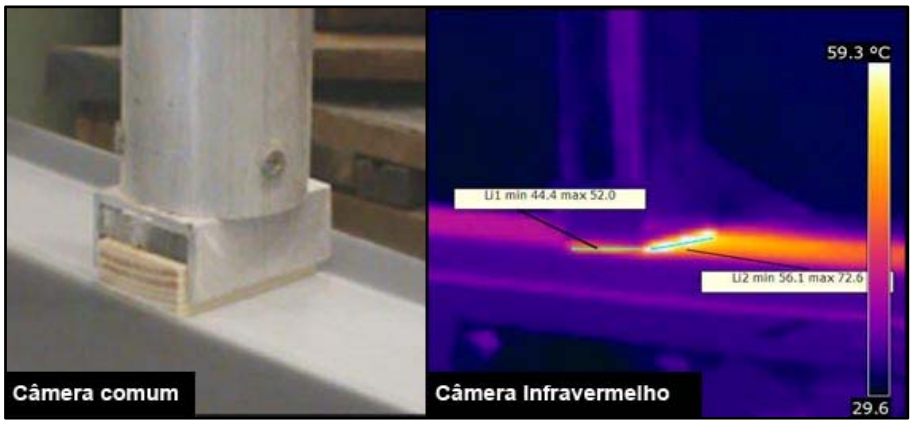

Figura 34 - Temperatura no ensaio de lixamento

- Análise da integridade superficial

Avaliou-se a integridade superficial das amostras lixadas através de um microscópico digital portátil da marca Avamscope max, modelo USB (Figura 35). O microscópico foi posicionado a 90º em relação à superfície lixada utilizando um aumento de 50 vezes. Para cada combinação apresentada na Tabela 10 foram tiradas fotos para análise do estado da superfície lixada decorrente da combinação dos níveis dos fatores estabelecidos.

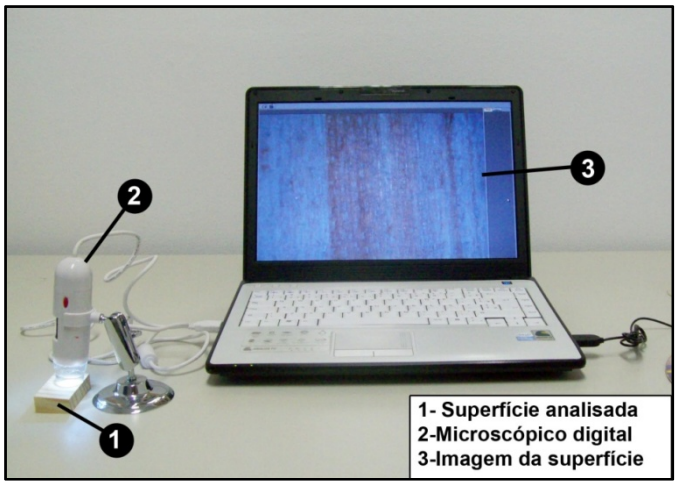

Figura 35 - Microscópico digital portátil para análise da integridade superficial

4.4.5 Planejamento Experimental

O experimento foi planejado para uma análise fatorial em blocos completamente aleatorizados. Os fatores considerados no presente estudo correspondem à velocidade de corte, pressão e granulometria de lixa. Considerou-se a granulometria de lixa como sendo o bloco e dentro de cada bloco foram combinados os fatores pressão e velocidade de corte em seus diferentes níveis (Tabela 10). Considerou-se o fator granulometria de lixa como bloco devido à dificuldade da substituição da lixa a todo o momento (aleatorização) no equipamento. Tanto a combinação dos fatores dentro de cada bloco quanto à seqüência de execução de cada bloco foram aleatorizados através de sorteio. A forma que foi organizada os fatores e seus níveis dentro de cada bloco de granulometria estão esquematizados na Tabela 13. Os valores dos níveis dos fatores Velocidade (V_n), Pressão (P_n) e Granulometria (G_n), indicados na Tabela 13, foram descritos no Item 4.4.3. Executaram-se 6 repetições para cada bloco (Tabela 13) totalizando 216 ensaios realizados no final do experimento, ou seja, 3 Velocidades de corte x 3 Pressões x 4 Granulometrias x 6 repetições, que corresponde a 216 unidades experimentais em blocos completamente aleatorizados.

Tabela 13 - Fatores e seus níveis dentro de cada bloco de granulometria

*C_n	BLOCO 1			BLOCO 2			BLOCO 3			BLOCO 4		
1	V_1	P_1	G_1	V_1	P_1	G_2	V_1	P_1	G_3	V_1	P_1	G_4
2	V_2	P_1	G_1	V_2	P_1	G_2	V_2	P_1	G_3	V_2	P_1	G_4
3	V_3	P_1	G_1	V_3	P_1	G_2	V_3	P_1	G_3	V_3	P_1	G_4
4	V_1	P_2	G_1	V_1	P_2	G_2	V_1	P_2	G_3	V_1	P_2	G_4
5	V_2	P_2	G_1	V_2	P_2	G_2	V_2	P_2	G_3	V_2	P_2	G_4
6	V_3	P_2	G_1	V_3	P_2	G_2	V_3	P_2	G_3	V_3	P_2	G_4
7	V_1	P_3	G_1	V_1	P_3	G_2	V_1	P_3	G_3	V_1	P_3	G_4
8	V_2	P_3	G_1	V_2	P_3	G_2	V_2	P_3	G_3	V_2	P_3	G_4
9	V_3	P_3	G_1	V_3	P_3	G_2	V_3	P_3	G_3	V_3	P_3	G_4

*C_n – número da combinação dentro de cada bloco

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados analisados nos tópicos seguintes correspondem às propriedades físicas da madeira de *Pinus elliottii* e as variáveis de saída do processo de lixamento, sendo as seguintes: taxa de remoção de material (MRR), temperatura, rugosidade, análise da integridade superficial através de imagem, potência consumida, força de lixamento, emissão acústica (EA), em função da combinação dos seguintes fatores de entrada: granulometria de lixa (bloco), pressão e velocidade de corte.

5.1 Análise física da madeira de *Pinus elliottii*

Os valores das densidades aparentes e básicas das amostras encontram-se no Apêndice A. A Tabela 14 apresenta o valor da densidade aparente média ($D_{apm,12\%}$), densidade básica média (D_{bm}), coeficiente de variação (CV), número de amostras (N) e o intervalo de confiança (IC; α=0,05). Em seu trabalho Carvalho & Rocco Lahr (2007) citam o valor da densidade aparente a 12% UE para o *Pinus elliottii* dentro de uma faixa que vai de 450 a 600 kg.m^{-3}. O resultado obtido, no presente estudo, para espécie de *Pinus elliottii* encontra-se dentro dessa faixa de variação. Para o valor da densidade básica média Santini *et al.* (2000) citam para espécie de *Pinus elliottii* uma variação de 470 a 540 kg.m^{-3}, valor esse que varia de acordo com a idade, local que espécie foi plantada, posição da árvore etc. Pode-se observar que o valor da densidade básica média encontrado no presente estudo apresenta-se dentro da faixa de variação (intervalo de confiança) para espécie de *Pinus elliottii*.

Tabela 14 - Densidade média básica e aparente para o *Pinus elliottii*

	D (kg.m^{-3})	CV (%)	N	IC
$D_{apm,\ 12\%}$	554,47	11,92	20	(523,54; 585,40)
D_{bm}	449,17	14,31	30	(425,17; 473,17)

5.2 Resultados do lixamento da madeira de *Pinus elliottii*

Para análise dos resultados das variáveis de saída no processo de lixamento, em função da combinação dos níveis dos fatores descritos no Item 4.4.5, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) através do software de estatística R versão 2.0.1, no qual se verificou o efeito e a interação entres os fatores pressão, velocidade de corte sobre as variáveis de saída com nível de significância de 5%, para os diferentes blocos de granulometrias de lixa.

Com essa análise pretende-se testar duas hipóteses sobre o processo de lixamento plano de *Pinus elliottii*, ou seja, a hipótese inicial (H_0) na qual parte-se que os fatores pressão e velocidade de corte não influenciam no processo de lixamento, e uma hipótese (H_1) alternativa, na qual verifica-se que esses fatores influenciam neste processo. Através dessa análise pretende-se realizar uma investigação exploratória inicial sobre o lixamento plano de *Pinus elliottii* com o intuito de conhecer quais fatores influenciam nesse processo e ser um marco inicial para futuras pesquisas.

5.2.1 Taxa de remoção de material

Os valores das Taxas de Remoção de Material das amostras encontram-se no Apêndice B. A Tabela 15 apresenta o valores médios da taxa de remoção de material (MRR_m), desvio padrão amostral (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada bloco e combinações possíveis.

Através da análise de variância verificou-se um efeito significativo do bloco (granulometria de lixa) sobre taxa de remoção de material (Tabela 16). Observou-se que para granulometrias mais grossas tem-se uma maior remoção de material com redução gradativa para granulometrias mais finas. Esse comportamento pode ser observado na Figura 36 através do gráfico "*Box plots*", no qual representa a distribuição dos valores das taxas entre os blocos. Nesse tipo de gráfico a parte inferior da caixa é representada por 25% dos dados, a linha central corresponde à mediana e a parte superior da caixa representa 75% dos dados. Os limites inferiores e superiores

representados neste gráfico correspondem à diferença de amplitude da caixa vezes 1,5 mais ou menos os extremos da caixa respectivamente.

Observa-se uma maior remoção de material nas granulometrias mais grossas devido a esses grãos possuírem uma maior área de contato superficial, além de apresentarem um arranjo mais espaçado entre si ao longo da distribuição da lixa, o que leva a um maior armazenamento e remoção de material, em contrapartida, granulometrias mais finas são menos espaçados ao longo da distribuição da lixa removendo uma menor quantidade de material.

Tabela 15 - Taxa de remoção de material média do lixamento

*C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
Bloco 1 (G80)									
*MRR_m	0,336	0,451	0,523	0,420	0,580	0,597	0,470	0,665	0,687
DP	0,046	0,068	0,075	0,097	0,081	0,081	0,075	0,071	0,157
CV(%)	13,57	15,02	14,25	23,15	14,02	13,52	15,95	10,63	22,93
Bloco 2 (G100)									
MRR	0,256	0,435	0,440	0,314	0,505	0,496	0,345	0,416	0,593
DP	0,104	0,091	0,105	0,096	0,128	0,078	0,143	0,151	0,146
CV(%)	40,86	20,95	23,88	30,51	25,31	15,81	41,58	36,33	24,69
Bloco 3 (G120)									
MRR	0,200	0,277	0,423	0,294	0,379	0,379	0,384	0,483	0,501
DP	0,053	0,099	0,134	0,054	0,110	0,097	0,123	0,115	0,090
CV(%)	26,68	35,80	31,58	18,43	29,01	25,51	31,96	23,83	17,89
Bloco 4 (G220)									
MRR	0,074	0,099	0,125	0,092	0,129	0,147	0,107	0,154	0,180
DP	0,024	0,025	0,076	0,024	0,037	0,048	0,030	0,051	0,071
CV(%)	33,20	25,63	61,09	25,86	28,75	32,50	28,09	33,15	39,46

*C_n – combinações possíveis em cada bloco, MRR_m – Taxa de remoção de material média ($cm^3 . s^{-1}$)

Taylor *et al.* (1999) relataram em seu trabalho que o efeito da granulometria na taxa de remoção de material se torna mais pronunciado para granulometrias mais finas, como observado na Figura 36 para a granulometria 220. O efeito na remoção de material para granulometria 220 em relação aos demais está relacionado à maior distância entre o tamanho dos grãos para as demais granulometrias estudadas.

Ratnasingam *et al.* (2010) estudaram o efeito do lixamento sobre a concentração de pó no ambiente e verificaram uma relação linear entre a taxa de remoção de material com a mudança nas granulometrias de lixa.

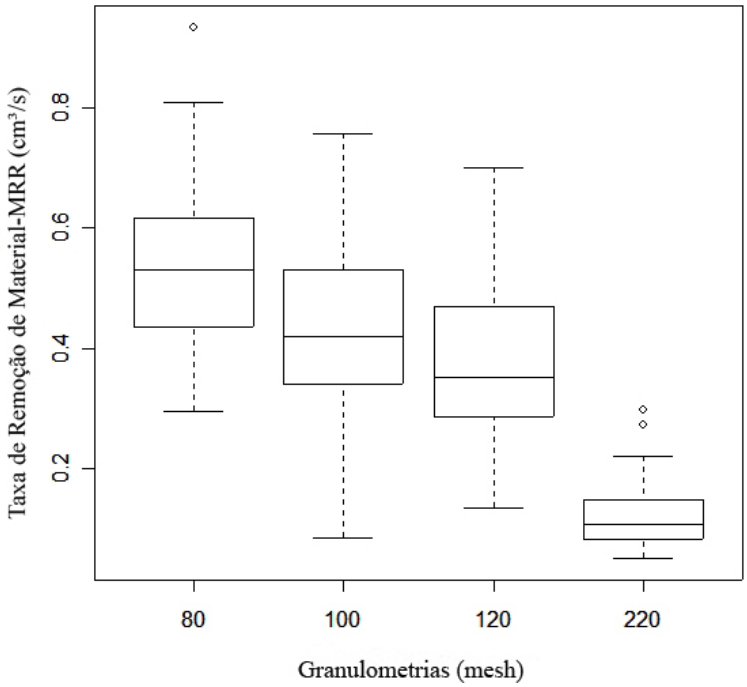

Figura 36 - Influência do bloco sobre a taxa de remoção de material

Para pressão aplicada observou-se um efeito significativo na taxa de remoção de material (Tabela 16). Como foi obtido um efeito significativo da pressão sobre a taxa de remoção criou-se um modelo linear que descreve o comportamento da remoção de material para faixa de pressões estudadas. O modelo encontrado para pressão na remoção de material pode ser observado na Equação 12. O valor do coeficiente de determinação ajustado para esse modelo corresponde a R^2= 5,24%, ou seja, o modelo explica apenas 5,24% da variação observada (Figura 37). Com essa porcentagem de ajuste esse modelo torna-se pouco preciso para descrever a remoção de material, mas é útil para observar que com a elevação da pressão ocorre um aumento na remoção de material para todos os blocos.

$$MRR = -0{,}1135 + 0{,}016 \times P \quad (12)$$

Onde: *MRR* = taxa de remoção de material, em $cm^3.s^{-1}$;

P = pressão aplicada no lixamento, em kPa;

P = [26, 33] kPa, intervalo de pressões válidas para o modelo.

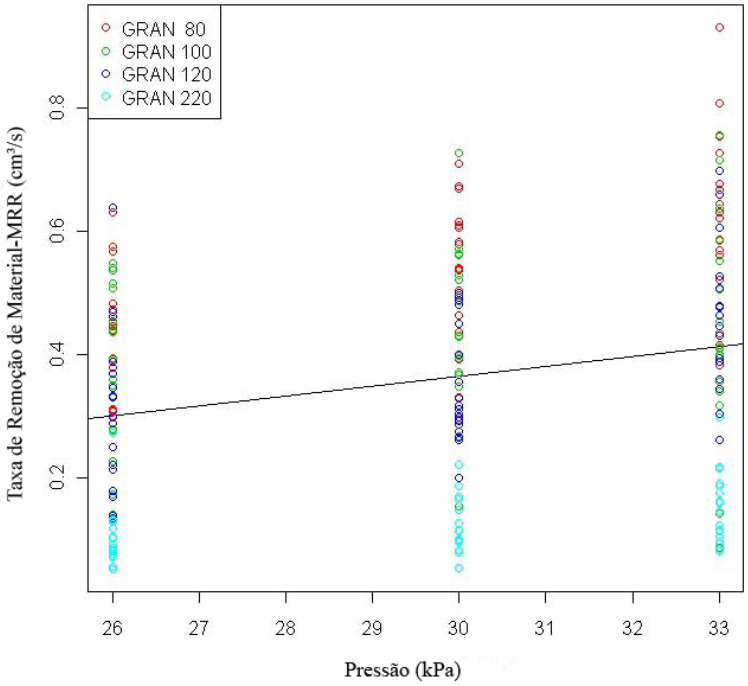

Figura 37 - Influência da pressão sobre a taxa de remoção de material

O efeito significativo da pressão sobre a remoção de material foi relatado por Taylor *et al.* (1999). Com relação à velocidade observou-se um efeito significativo na taxa de remoção de material (Tabela 16). Assim como para pressão, obteve-se um modelo linear para descrição da taxa de remoção na faixa de velocidades estudadas. O modelo encontrado para velocidade na remoção de material pode ser observado pela Equação 13. O valor do coeficiente de determinação ajustado para esse modelo corresponde a R^2= 9,73%, ou seja, o modelo explica apenas 9,73% da variação observada (Figura 38). Da mesma forma como no modelo encontrado para pressão, o modelo para taxa de remoção de material em função da velocidade é pouco preciso, podendo-se observar apenas que com elevação da velocidade ocorre um aumento na taxa de remoção de material. Saloni *et al.* (2005) afirmam que para maioria dos seus resultados a taxa de remoção de material aumentou com elevação da velocidade.

$$MRR = -0{,}052 + 0{,}037 \times V \quad (13)$$

Onde: MRR = taxa de remoção de material, em $cm^3.s^{-1}$;

V = velocidade no lixamento, em $m.s^{-1}$;

V = [9, 13] $m.s^{-1}$, intervalo de velocidades válidas para o modelo.

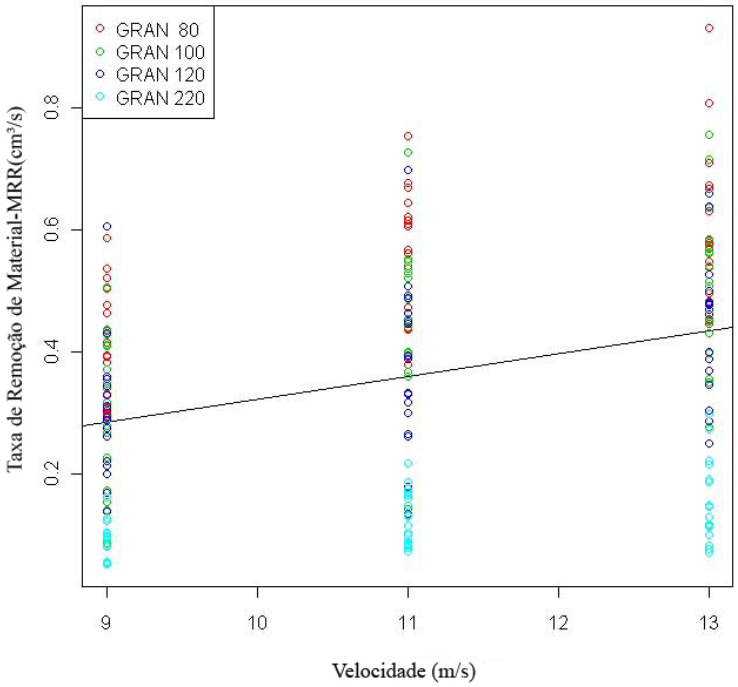

Figura 38 - Influência da velocidade sobre a taxa de remoção de material

Não houve interação significativa entre a velocidade e a pressão para taxa de remoção de material (Tabela 16).

Tabela 16 - Análise de variância para taxa de remoção de material

Fatores	GL	SQ	SQM	Valor F	Pr (>F)
Bloco	3	4,7238	1,57459	169,3733	$2{,}2.10^{-16}$ *
Velocidade	2	0,8565	0,42824	46,0641	$2{,}210^{-16}$ *
Pressão	2	0,4541	0,22705	24,4231	$3{,}097.10^{-10}$*
Pressão x Velocidade	4	0,0256	0,00640	0,6888	0,6005
Resíduo	204	1,8965	0,00930	-	-

*Valor significativo a um nível de 5% de significância.

5.2.2 Temperatura no lixamento

Os valores das temperaturas das amostras lixadas encontram-se no Apêndice B. A Tabela 17 apresenta os valores médios da temperatura no lixamento (T_m), desvio padrão amostral e coeficiente de variação para cada bloco e combinações possíveis.

Tabela 17 - Temperatura média do lixamento

*C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
Bloco 1 (G80)									
T_m (ºC)	77,0	73,7	74,9	70,6	71,7	81,0	73,5	76,2	79,1
DP	4,7	7,9	5,7	4,7	4,5	6,7	4,7	5,2	5,9
CV(%)	6,1	10,7	7,6	6,7	6,3	8,3	6,4	6,9	7,4
Bloco 2 (G100)									
T_m (ºC)	75,6	72,6	77,9	79,4	74,2	77,5	78,3	81,4	77,0
DP	7,3	9,3	8,9	8,4	9,9	7,8	8,8	9,6	3,4
CV(%)	9,6	12,8	11,5	10,6	13,3	10,1	11,2	11,8	4,4
Bloco 3 (G120)									
T_m (ºC)	75,9	75,8	73,8	74,0	77,4	82,9	70,9	72,0	78,6
DP	10,2	9,3	8,9	8,9	11,1	7,5	8,8	4,3	6,1
CV(%)	13,4	12,3	12,1	12,0	14,3	9,0	12,4	6,0	7,7
Bloco 4 (G220)									
T_m (ºC)	77,0	79,4	81,2	83,1	82,5	80,8	88,2	82,1	91,1
DP	6,9	3,2	11,1	6,5	6,7	10,6	5,6	14,4	14,5
CV(%)	9,0	4,1	13,7	7,8	8,1	13,1	6,3	17,6	15,9

*C_n – combinações possíveis em cada bloco

Através da análise de variância notou-se que o efeito da temperatura no processo de lixamento foi significativo apenas para o bloco (Tabela 18). Observou-se uma tendência de elevação para temperatura na granulometria de 220 mesh (Figura 39). A elevação da temperatura para granulometria mais fina deve-se ao maior número de grãos em contato com a madeira, onde esses grãos são menores e removem uma menor quantidade de material e dependendo da espécie de madeira os espaços entre esses grãos ficam incrustados por extrativos (resinas) em conjunto com material removido, o que reduz ainda mais a taxa de remoção de material contribuindo para elevação da

temperatura. Isso pode ser observado para espécie de *Pinus elliottii* durante o lixamento (Figura 40).

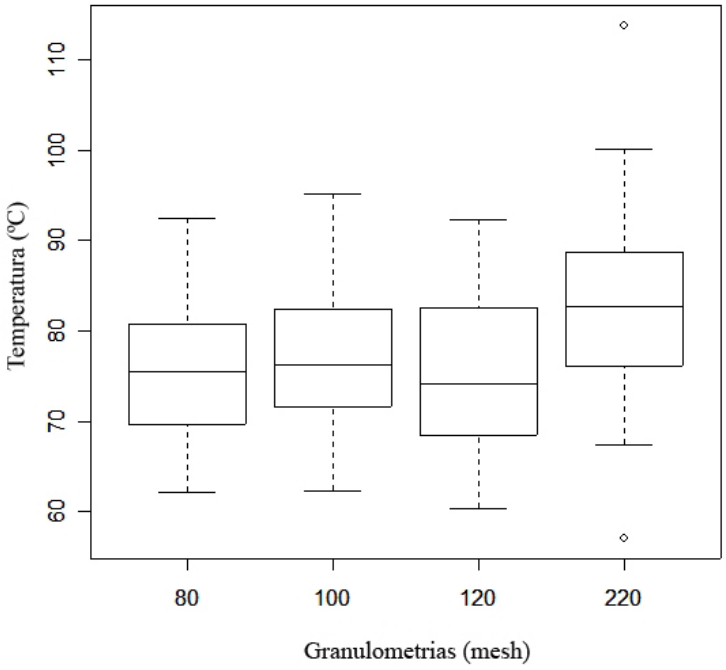

Figura 39 - Influência do bloco sobre a temperatura no lixamento

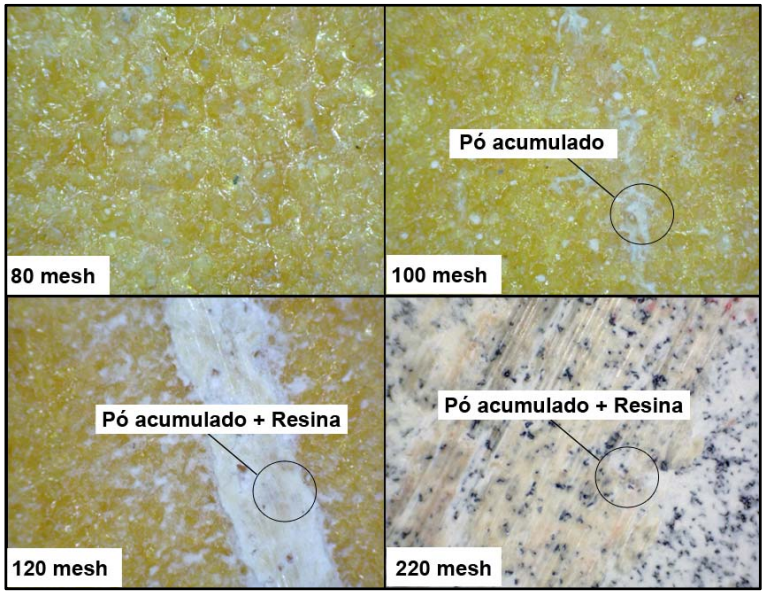

Figura 40 - Acúmulo de material no abrasivo observado durante o lixamento

Essa espécie é conhecida por produzir muita resina e durante o lixamento as granulometrias mais grossas não sofreram com a resina liberada devido ao maior espaço existente entre os grãos que permite maior armazenamento de material removido, mas conforme se reduz o tamanho do grão (granulometrias mais finas)

pode-se notar, Figura 40, que a resina ficou impregnada com material compactado preenchendo os espaços vazios entre os grãos, assim contribuindo para elevação da temperatura devido a perda de corte do grão abrasivo.

A variação da velocidade não foi significativa para temperatura de lixamento, bem como a variação da pressão (Tabela 18). Não houve interação entre os fatores velocidade e pressão no lixamento. A influência da velocidade e da pressão na temperatura pode ser observada na Figura 41, pode-se notar que não há uma tendência de variação na temperatura para os níveis desses fatores. Uma possível explicação para esse fato ter ocorrido para espécie de *Pinus elliottii* está relacionado à sua densidade. A espécie apresenta uma média densidade, o que torna relativamente fácil a remoção de material, não causando tanto atrito na região de lixamento devido aos menores esforços para retirada desse material, assim não havendo uma variação brusca da temperatura com a mudança de velocidade e pressão.

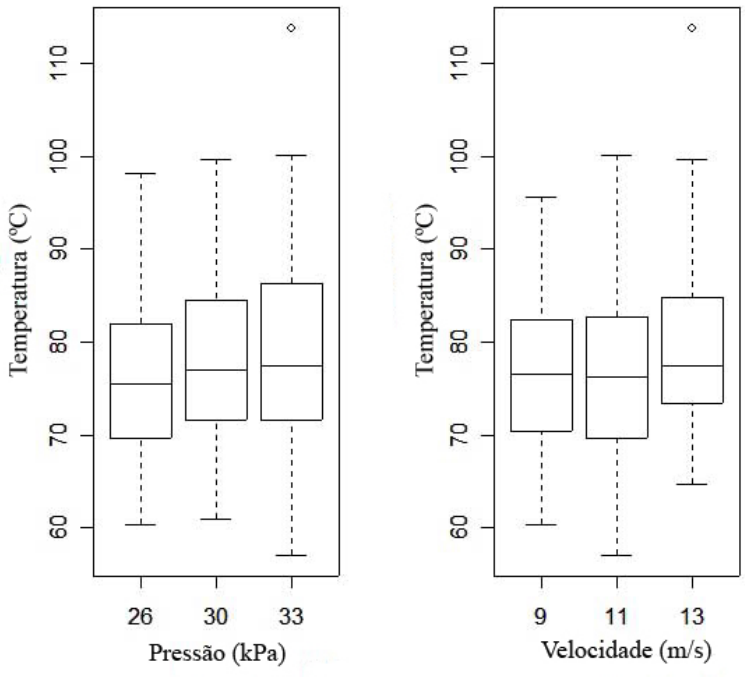

Figura 41 - Influência da pressão e velocidade na temperatura de lixamento

O que pode ser observado durante os ensaios foi que dependendo da posição que a amostra foi retirada, do centro (lenho juvenil) ou da periferia da tora (lenho adulto) tem-se uma maior concentração de material (maior densidade) e conseqüentemente maior temperatura. Além disso, dependendo do plano de corte essa temperatura pode

ser maior ou menor. Observou-se que para o lixamento de planos tangenciais obtinha-se uma elevação da temperatura devido a uma maior superfície de contato de lenho tardio (maior densidade) se comparado com a temperatura de lixamento de um plano radial. Essa variação na temperatura observada devido ao posicionamento dos planos de corte, quantidade de anéis de crescimento, lenha juvenil e tardio, entre outros não foram o objetivo desse estudo, ou seja, tanto a posição no tronco bem como os planos de corte foram retirados de forma aleatória.

Tabela 18 - Análise de variância para temperatura no lixamento

Fatores	GL	SQ	SQM	Valor F	Pr (>F)
Bloco	3	1962,5	654,16	9,5473	$6{,}28.10^{-06}$ *
Velocidade	2	402,2	201,10	2,9350	0,05538
Pressão	2	284,8	142,40	2,0782	0,12780
Pressão x Velocidade	4	87,2	21,81	0,3183	0,86551
Resíduo	204	13977,7	68,52	-	-

*Valor significativo a um nível de 5% de significância.

5.2.3 Rugosidade

Os valores das rugosidades das amostras lixadas encontram-se no Apêndice B. A Tabela 19 apresenta os valores médios da rugosidade ($R_{a,m}$), desvio padrão amostral e coeficiente de variação para cada bloco e combinações possíveis.

Para rugosidade apenas o bloco de lixa foi significativo na análise de variância (Tabela 20). Observou-se um melhor acabamento à medida que se reduz o tamanho do grão. Essa variação significativa da influência da granulometria sobre a rugosidade pode ser observada na Figura 42.

Para velocidade de corte não foi encontrado uma influência significativa sobre a rugosidade assim como para variação da pressão no acabamento superficial (Tabela 20). Não houve interação entre a velocidade e a pressão sobre a rugosidade. Tanto a influência da velocidade quanto da pressão sobre o acabamento superficial podem ser observados na Figura 43, e não se percebe uma diferença significativa desses fatores sobre a rugosidade da madeira.

Tabela 19 - Rugosidade média do lixamento

*C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
Bloco 1 (G80)									
$R_{a,m}$ (µm)	8,20	8,19	7,84	7,99	8,15	8,29	8,66	8,96	7,81
DP	0,90	0,61	0,89	0,53	1,22	0,89	0,97	0,94	0,95
CV(%)	10,9	7,5	11,4	6,6	15,0	10,7	11,3	10,5	12,1
Bloco 2 (G100)									
$R_{a,m}$ (µm)	6,26	6,50	6,24	6,46	6,47	5,96	6,19	6,08	5,83
DP	0,72	0,71	0,72	0,83	0,65	0,39	0,43	0,74	1,01
CV(%)	11,5	10,9	11,6	12,9	10,1	6,5	7,0	12,1	17,3
Bloco 3 (G120)									
$R_{a,m}$ (µm)	5,48	5,31	5,27	5,47	5,36	5,41	5,76	5,46	5,37
DP	0,90	0,50	1,06	0,60	0,65	0,97	0,91	0,91	0,62
CV(%)	16,4	9,4	20,0	11,0	12,1	17,9	15,7	16,7	11,6
Bloco 4 (G220)									
$R_{a,m}$ (µm)	3,01	2,94	3,35	3,93	3,20	3,26	3,21	3,12	3,42
DP	0,57	0,18	0,48	0,84	0,56	1,06	0,44	0,66	0,35
CV(%)	19,1	6,2	14,4	21,3	17,6	32,5	13,8	21,2	10,2

*C_n – combinações possíveis em cada bloco

Taylor *et al.* (1999) testaram diversos parâmetros no processo de lixamento e verificaram que pressão não foi significativa para o acabamento superficial para as quatro espécies de folhosas (*Acer saccharum, Quercus alba, Prunus serotina*) e uma de espécie de conífera (*Pinus strobus*). Saloni *et al.* (2005) obtiveram resultado similar, ou seja, o fator pressão não afetou o acabamento superficial para os níveis testados para duas espécies de árvore estudadas, sendo uma folhosa (*Acer saccharum*) e uma conífera (*Pinus strobus*). Diferente de Taylor *et al.* (1999), Saloni *et al.* (2005) variaram a velocidade no lixamento. A faixa de variação da velocidade utilizada por esse autor vai de 10 a 13 $m.s^{-1}$ e os mesmos afirmam que com o aumento da velocidade a rugosidade de ambas as espécies estudas melhorou, mas não destacou se essa melhora foi significativa. No presente trabalho, como descrito acima, não foram encontrados influência significativas da velocidade e pressão sobre a rugosidade.

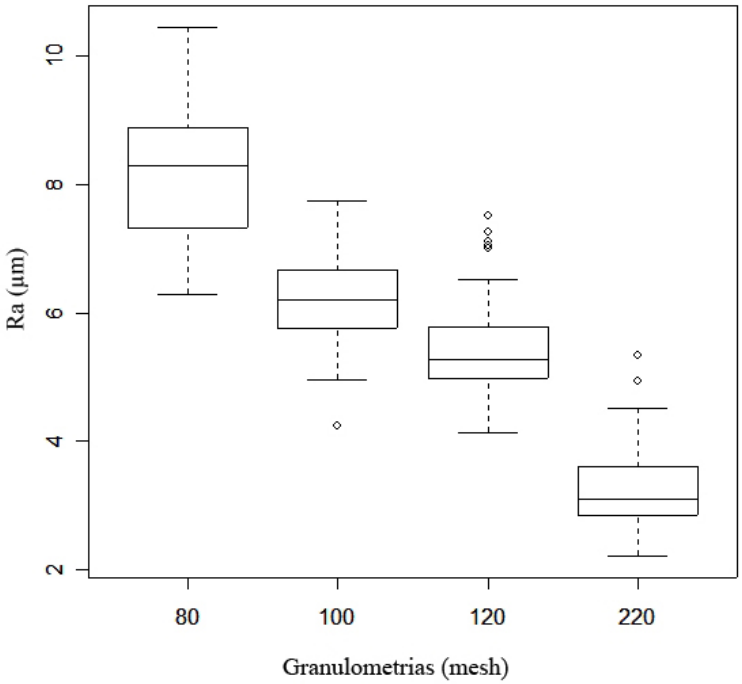

Figura 42 - Influência do bloco sobre a rugosidade no lixamento

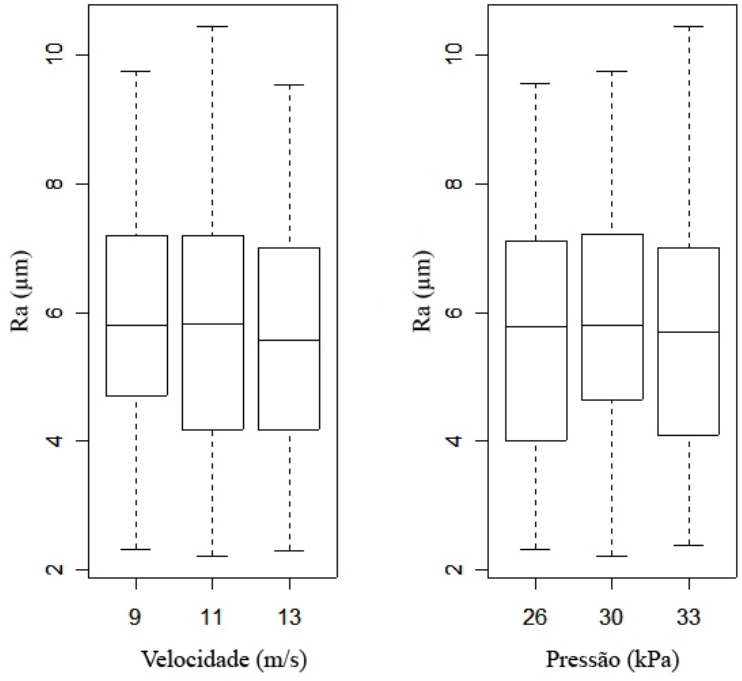

Figura 43 - Influência da pressão e velocidade na rugosidade

Tabela 20 - Análise de variância para rugosidade no lixamento

Fatores	GL	SQ	SQM	Valor F	Pr (>F)
Bloco	3	227,234	681,70	371,219	2.10^{-16} *
Velocidade	2	1,68	0,842	1,3761	0,2549
Pressão	2	0,58	0,288	0,4699	0,6257
Pressão x Velocidade	4	0,72	0,181	0,2956	0,8806
Resíduo	204	124,87	0,612	-	-

*Valor significativo a um nível de 5% de significância.

5.2.4 Potência consumida

Os valores das potências das amostras lixadas encontram-se no Apêndice B. A Tabela 21 apresenta os valores médios da potência consumida ($P_{c,m}$), desvio padrão amostral e coeficiente de variação para cada bloco de granulometria e combinações possíveis.

Diferente dos outros resultados discutidos, o efeito do bloco não influenciou significativamente na potência consumida para análise de variância (Tabela 22). Como pode ser observado na Figura 44 não houve influência dos blocos sobre a potência consumida no lixamento. Esse comportamento não era esperado em relação ao bloco, sendo esperado que ocorresse maior consumo de potência para granulometrias mais grossas, maior remoção de material, e redução no consumo de potência conforme se avança para granulometrias mais finas, menor remoção de material. Uma possível explicação para o fato da mudança do tamanho dos grãos não influenciarem no consumo de potência pode estar relacionado à média densidade da madeira, que não exige grandes esforços para remoção de material, devido isso não tenha ocorrido uma influência significativa do consumo de potência com a mudança das granulometrias.

Tabela 21 - Consumo de potência média do lixamento

*C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
Bloco 1 (G80)									
$P_{c,m}$ (W)	161,75	165,12	236,30	192,25	229,68	248,41	292,74	273,95	306,13
DP	12,3	11,7	78,3	17,1	62,6	16,5	63,5	66,7	83,6
CV(%)	7,6	7,1	33,1	8,9	27,3	6,6	21,7	24,4	27,3
Bloco 2 (G100)									
$P_{c,m}$ (W)	184,80	210,44	201,92	208,66	299,37	242,95	282,40	247,72	292,75
DP	49,5	76,7	6,9	12,5	99,7	17,1	72,0	12,7	17,2
CV(%)	26,8	36,5	3,4	6,0	33,3	7,0	25,5	5,1	5,9
Bloco 3 (G120)									
$P_{c,m}$ (W)	175,39	182,20	202,69	253,41	210,47	263,77	290,07	319,91	327,77
DP	22,5	32,1	27,8	91,6	25,1	53,0	65,1	107,1	82,3
CV(%)	12,8	17,6	13,7	36,1	11,9	20,1	22,4	33,5	25,1
Bloco 4 (G220)									
$P_{c,m}$ (W)	179,42	210,56	235,97	269,94	223,73	237,34	267,03	255,92	310,75
DP	19,6	54,6	50,1	66,5	43,6	22,4	21,1	69,6	60,2
CV(%)	10,9	25,9	21,2	24,6	19,5	9,5	7,9	27,2	19,4

*C_n – combinações possíveis em cada bloco

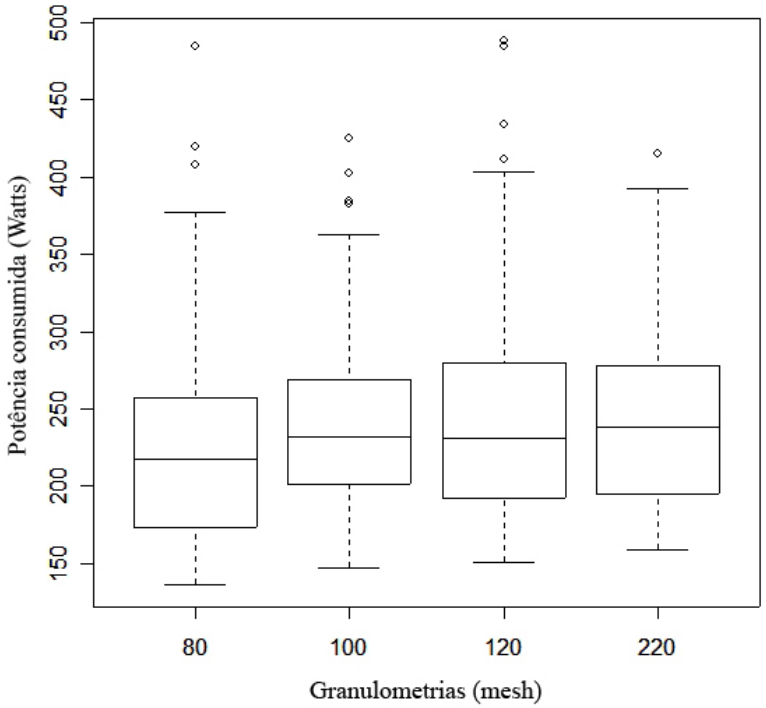

Figura 44 - Influência do bloco sobre a potência consumida no lixamento

Ao contrário do bloco a velocidade produziu um efeito significativo sobre o consumo de potência no lixamento (Tabela 22). Como o efeito da velocidade foi significativo para consumo de potência obteve-se um modelo linear para observação da tendência do consumo com a variação da velocidade. O modelo encontrado para velocidade no consumo de potência pode ser observado na Equação 14. O valor do coeficiente de determinação ajustado para esse modelo corresponde a R^2= 2,51%, ou seja, o modelo explica apenas 2,51% da variação observada (Figura 45). Da mesma forma como nos modelos encontrados para taxa de remoção de material esse modelo é pouco preciso não havendo como utilizá-lo para previsão do consumo de potência para velocidade. Observar-se apenas que com elevação da velocidade ocorre um aumento no consumo de potência, uma tendência linear na faixa de velocidades estudadas.

$$POT = 161{,}54 + 7{,}27 \times V \tag{14}$$

Onde: POT = Potência consumida, em Watts;

V = velocidade no lixamento, em $m.s^{-1}$;

V = [9, 13] $m.s^{-1}$, intervalo de velocidades válidas para o modelo.

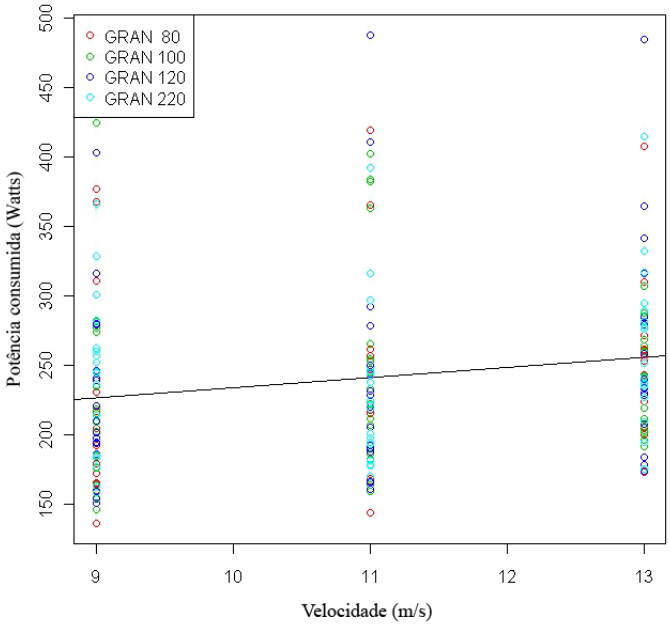

Figura 45 - Influência da velocidade sobre a potência consumida

Da mesma forma, o fator pressão influenciou significativamente no consumo de potência (Tabela 22). Pode-se observar uma maior tendência do consumo de potência com a variação da pressão se comparado com a variação da velocidade (Figura 46). Como o efeito da pressão foi significativo para consumo de potência obteve-se um modelo linear para observação da tendência do consumo de potência com a variação da pressão. A Equação 15 mostra o modelo encontrado para pressão no consumo de potência. O valor do coeficiente de determinação ajustado para esse modelo corresponde a R^2= 29,92%, ou seja, o modelo explica 29,92% da variação observada. O modelo encontrado para pressão no consumo de potência foi o que obteve um dos melhores ajustes, mais ainda é pouco preciso para previsão de resultados.

$$POT = -150{,}70 + 13{,}22 \times P \quad (15)$$

Onde: *POT* = Potência consumida, em Watts;

P = Pressão no lixamento, em kPa;

P = [26, 33] kPa, intervalo de pressões válidas para o modelo.

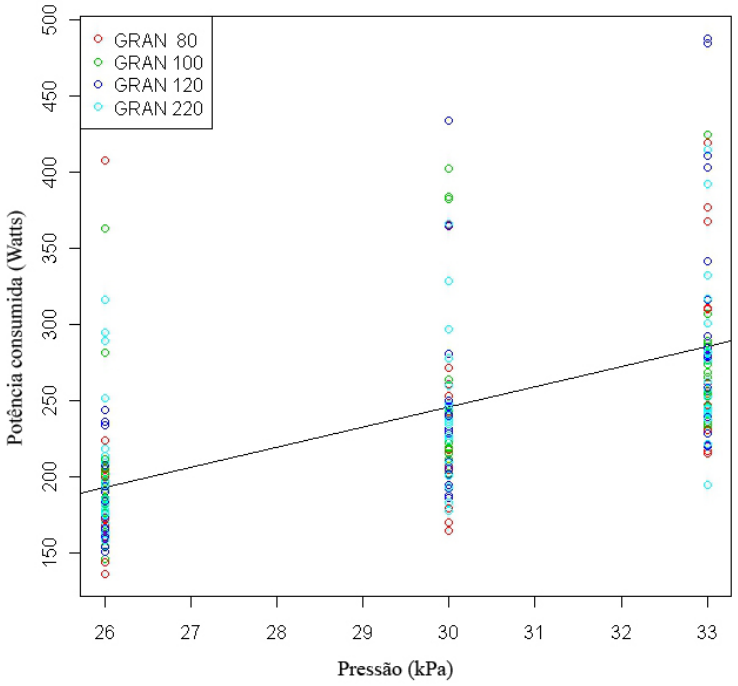

Figura 46 - Influência da pressão sobre a potência consumida

Não houve interação entre os fatores velocidade e pressão para o consumo de potência (Tabela 22). Os resultados obtidos por diversos autores (Saloni *et al.* (2005), Ratnasingam *et al.* (2002), Javorek *et al.* (2006), Porankiewicz *et al.* (2010)) relatam o mesmo tipo de tendência observado com relação ao aumento da velocidade e pressão no consumo de potência, sendo essa uma relação linear crescente.

Tabela 22 - Análise de variância para potência consumida no lixamento

Fatores	GL	SQ	SQM	Valor F	Pr (>F)
Bloco	3	5023	1674	0,5145	0,672725
Velocidade	2	33983	16992	5,2212	0,006146 *
Pressão	2	314161	157080	48,2676	$2{,}2.10^{-16}$ *
Pressão x Velocidade	4	8990	2247	0,6906	0,599224
Resíduo	204	663890	3254	-	-

*Valor significativo a um nível de 5% de significância.

5.2.5 Força de lixamento

Os valores das forças das amostras lixadas encontram-se no Apêndice B. A Tabela 23 apresenta os valores médios da força de lixamento (F_m), desvio padrão amostral e coeficiente de variação para cada bloco de granulometria e combinações possíveis.

Para força de lixamento o efeito do bloco foi significativo (Tabela 24). A Figura 47 mostra esse efeito do bloco sobre a força de lixamento, o que pode ser observado nesse gráfico é que apenas o bloco da lixa 220 mostrou-se diferente com relação à força das demais granulometrias.

Para velocidade de corte não houve efeito significativo na força de lixamento (Tabela 24). A força para as diferentes velocidades de lixamento pode ser observada na Figura 48, pode-se observar que não existem diferenças nas velocidades para força. Uma provável explicação para velocidade não ter influenciado na força pode estar relacionado à faixa de velocidade estar muito estreita, não influenciando na força em conjunto com a média densidade da madeira que não exige grandes esforços para remoção do material com a variação da velocidade.

Tabela 23 - Força média de lixamento

*C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
Bloco 1 (G80)									
F_m (N)	12,03	12,07	13,39	14,41	15,91	15,01	18,51	18,55	17,82
DP	1,8	1,6	2,0	1,7	1,2	1,8	2,0	1,6	2,6
CV(%)	14,7	13,5	15,2	12,1	7,5	12,1	11,0	8,4	14,5
Bloco 2 (G100)									
F_m (N)	12,33	14,21	13,09	14,14	16,97	15,03	17,06	16,12	17,86
DP	2,0	1,3	2,2	2,5	2,6	1,3	3,2	2,9	2,4
CV(%)	16,1	9,1	16,8	17,7	15,2	8,9	18,8	18,1	13,6
Bloco 3 (G120)									
F_m (N)	11,90	12,02	13,34	14,73	16,13	14,41	18,50	18,89	18,20
DP	1,1	2,2	1,2	1,7	3,1	2,2	3,3	2,6	2,4
CV(%)	9,4	18,4	8,7	11,5	19,0	15,0	17,7	13,8	13,4
Bloco 4 (G220)									
F_m (N)	9,34	10,20	9,77	13,49	12,28	11,81	13,72	15,04	14,79
DP	2,2	1,3	3,1	3,1	1,4	1,9	2,8	3,0	3,2
CV(%)	23,4	12,4	31,4	23,1	11,3	16,0	20,7	19,9	21,4

*C_n – combinações possíveis em cada bloco

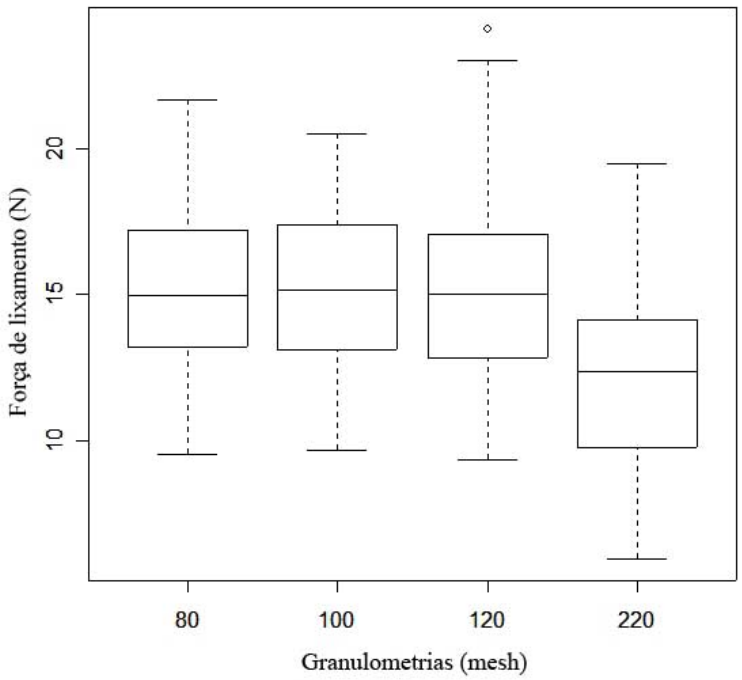

Figura 47 - Influência do bloco sobre a força de lixamento

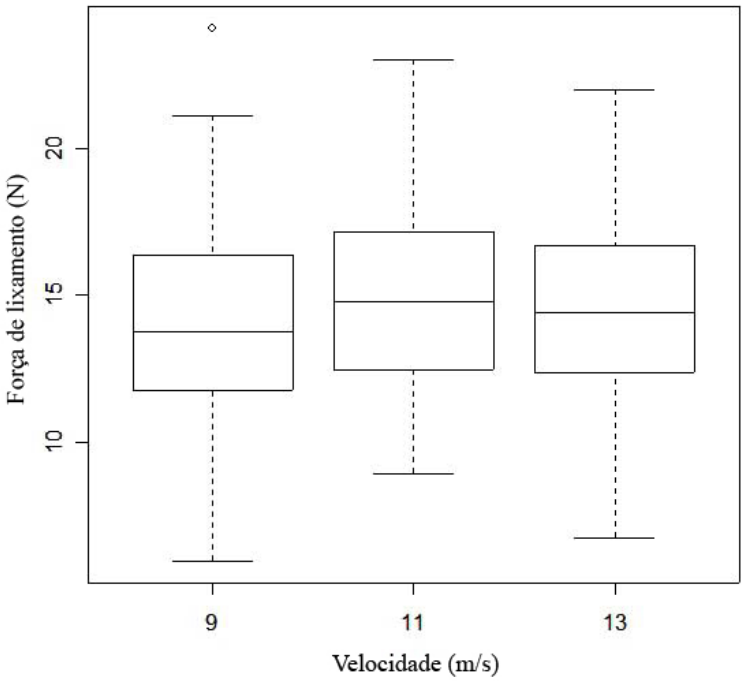

Figura 48 - Influência da velocidade sobre a força de lixamento

O efeito da pressão sobre a força de lixamento foi significativo para análise de variância (Tabela 24). Como o efeito do fator pressão sobre força de lixamento foi pronunciado, obteve-se um modelo linear para observação da tendência da força de lixamento com a variação da pressão (Figura 49). A Equação 16 mostra o modelo ajustado para pressão relacionado à força de lixamento. O valor do coeficiente de determinação ajustado corresponde a R^2= 38,58%, ou seja, o modelo explica 38,58% da variação observada. O modelo encontrado para pressão na força de lixamento foi o que obteve o melhor ajuste entre todos os resultados, mais ainda é pouco preciso para previsão. Deve-se observar, assim como na potência, que o fator pressão tem uma influência forte na força de lixamento e percebe-se que com a elevação da pressão tem-se uma maior força com uma tendência linear crescente, como pode ser visto no gráfico da Figura 52. Não foi observada interação entre os fatores pressão e velocidade para força de lixamento ($F_{4,204}$=0,9392; valor p>0,05).

$$FORC = -6{,}99 + 0{,}726 \times P \quad (16)$$

Onde: *FORC* = força de lixamento, em Newtos;

P = Pressão no lixamento, em kPa;

P = [26, 33] kPa, intervalo de pressões válidas para o modelo.

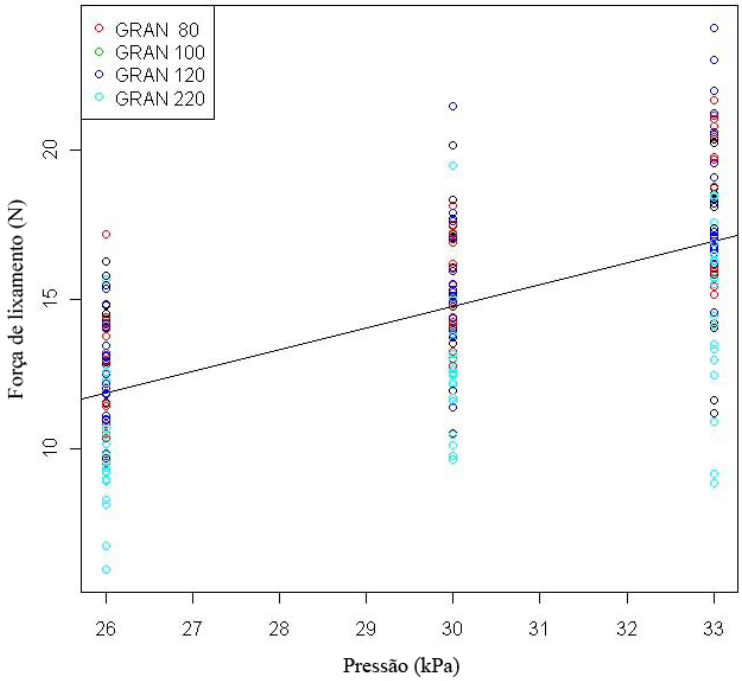

Figura 49 - Influência da pressão sobre a força de lixamento

Tabela 24 - Análise de variância para força no lixamento

Fatores	GL	SQ	SQM	Valor F	Pr (>F)
Bloco	3	368,00	122,67	23,6067	$3{,}708.10^{-13}$ *
Velocidade	2	16,94	8,47	1,6300	0,1985
Pressão	2	941,72	470,86	90,6150	$2{,}2.10^{-16}$ *
Pressão x Velocidade	4	19,52	4,88	0,9392	0,4422
Resíduo	204	1060,04	5,20	-	-

*Valor significativo a um nível de 5% de significância.

5.2.6 Emissão acústica

Os valores das EA das amostras lixadas encontram-se no Apêndice B. A Tabela 25 apresenta os valores médios da máxima EA ($EA_{max,m}$), desvio padrão amostral e coeficiente de variação para cada bloco de granulometria e combinações possíveis.

Tabela 25 - Valores médios da máxima emissão acústica

*C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
Bloco 1 (G80)									
*$EA_{max,m}$	4,62	4,89	4,82	4,51	5,00	4,71	4,56	5,09	4,69
DP	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
CV(%)	4,1	4,2	5,9	5,4	6,1	5,2	6,4	5,5	7,2
Bloco 2 (G100)									
$EA_{max,m}$	4,58	4,72	4,49	4,31	4,68	4,66	4,81	4,44	4,96
DP	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,6	0,4	0,4
CV(%)	9,2	8,4	5,3	5,3	4,9	1,3	12,3	8,6	7,3
Bloco 3 (G120)									
$EA_{max,m}$	4,45	4,53	4,69	4,59	4,61	4,48	4,65	5,01	4,51
DP	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	0,5	0,3
CV(%)	5,6	5,9	7,5	9,1	5,3	2,9	6,3	10,1	6,0
Bloco 4 (G220)									
$EA_{max,m}$	4,27	4,33	4,13	4,29	4,22	4,27	4,18	4,28	4,15
DP	0,2	0,2	0,0	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
CV(%)	5,4	4,9	0,6	6,8	3,0	4,3	1,6	5,3	1,6

*Cn – combinações possíveis em cada bloco, *$EA_{max,m}$ - unidade em Volts

Para captação do sinal de EA, diferentemente dos outros sinais que correspondem aos pontos médios ao longo do lixamento (ex. força, potência), armazenou-se o máximo sinal de EA no intervalo de lixamento. Optou-se por coletar o sinal de máximo EA devido à dificuldade de obter um sinal constante ao longo do lixamento, sendo observados apenas picos pontuais ao longo do ensaio. Notou-se que essa dificuldade de coleta do sinal constante está atribuída a heterogeneidade do material madeira que devido sua estrutura anatômica complexa gera sinais variados ao longo do processo de usinagem.

O efeito do bloco sobre a EA no lixamento foi significativo na análise de variância (Tabela 26). Observou-se que para granulometrias mais grossas tem-se um sinal mais elevado EA com tendência de queda conforme aumenta-se para granulometrias mais finas (Figura 50). Esse maior sinal está relacionado ao tamanho do grão da lixa, ou seja, maior superfície de contato para maiores grãos, ocorrendo uma maior remoção de material, gerando maiores tensões internas nas quais o sensor

de EA capta com maior freqüência. Já para grãos de lixas menores ocorre justamente o contrário. Esse tipo de comportamento observado possivelmente está relacionado ao material que está sendo usinado. No presente estudo utilizou-se a madeira de *Pinus elliottii* de média densidade, onde para outros tipos de espécies podem-se ter comportamentos diferentes que estarão relacionados a diversos fatores inerentes ao processo e a características do material.

O sinal de EA para os níveis de velocidade não foi significativo para análise de variância bem como para os níveis de pressão testados (Tabela 26). A Figura 51 ilustra a independência da velocidade e pressão sobre o sinal de EA captado. Não foi observada interação entre a velocidade e pressão para o sinal EA (Tabela 26).

Com isso, nota-se que a utilização do sinal de EA para controle do processo relacionado ao desgaste dos grãos pode ser válida para o *Pinus elliottii*, ou seja, controlando o sinal ao longo do tempo para um determinado tamanho de grão de lixa, de forma que na medida em que o sinal comece a decair, pode-se relacionar que os grãos desse abrasivo estão se desgastando e a ferramenta deve ser trocada. Essa é uma hipótese a ser testada e verifica em estudos futuros. Matsumoto & Murase (1998) encontraram resultado semelhante para o sinal EA no processo de lixamento, os autores observaram uma baixa amplitude do sinal para granulometrias mais finas e maior amplitude do sinal para granulometrias mais grossas.

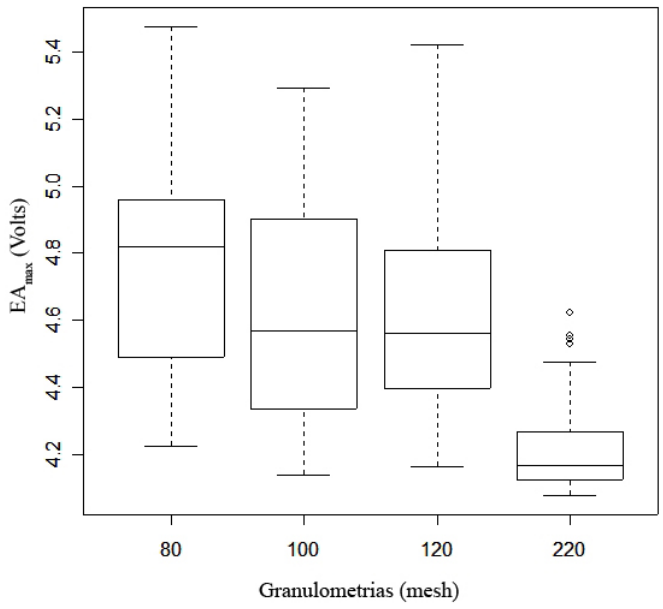

Figura 50 - Influência do bloco sobre a emissão acústica

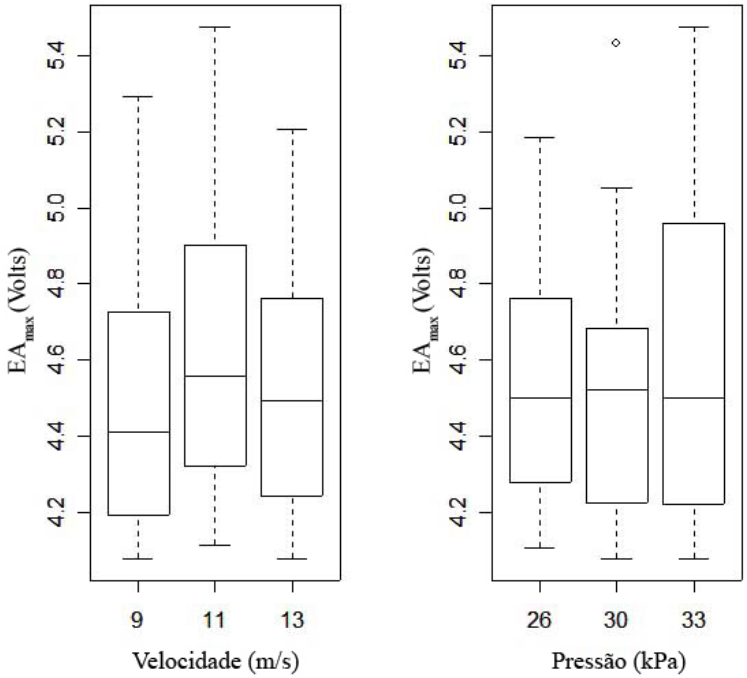

Figura 51 - Influência da pressão e velocidade na EA

Tabela 26 - Análise de variância para EA no lixamento

Fatores	GL	SQ	SQM	Valor F	Pr (>F)
Bloco	3	4,2243	1,40811	15,6434	$2{,}325.10^{-08}$ *
Velocidade	2	0,4965	0,24825	2,7579	0,06845
Pressão	2	0,1471	0,07354	0,8170	0,44482
Pressão x Velocidade	4	0,0237	0,00592	0,0658	0,99192
Resíduo	96	8,6412	0,09001	-	-

*Valor significativo a um nível de 5% de significância.

5.2.7 Análise da integridade superficial

De acordo com Item 5.2.3 o valor da rugosidade superficial não foi influenciado significativamente pela velocidade e pressão no lixamento, tendo apenas influência significativa do bloco granulometria de lixa. A partir desse resultado optou-se por não comparar as imagens feitas dos corpos de prova lixados entre as pressões e velocidades em cada bloco, mas apenas comparar algumas diferenças observadas na

superfície lixada entre os blocos de granulometria com relação a aspectos anatômicos e de textura da madeira.

As Figuras 52 e 53 ilustram a superfície lixada com granulometria 80 mesh nos planos tangencial e radial respectivamente com ampliação de 50 vezes (50x). A orientação das fibras e o sentido que os grãos passaram sobre a superfície corresponde à direção (Y) indicada nas figuras. Observando-se essas superfícies nota-se que existem pontos claros e escuros indicando a existência de picos e vales, onde se percebe que existem crateras formadas pelos grãos ao longo da superfície (ex. circulo A, Figura 52 e 53). Esse aspecto observado com acabamento grosseiro é característico da granulometria 80 mesh, na qual não tem a função de produzir uma superfície uniforme e sim realizar a remoção de material, o que foi observado nos resultados do Item 5.2.1 para taxa de remoção de material e no Item 5.2.3 para rugosidade. Essas crateras observadas no lixamento com granulometria 80 se devem ao maior espaçamento entre os grãos ao longo da distribuição da lixa, ao tamanho dos grãos que muitas vezes se excedem um em relação ao outro tanto na altura como comprimento e a características anatômicas do material lixado.

Com relação à característica anatômica, notou-se que no aspecto visual o acabamento para o plano tangencial foi melhor em relação ao plano radial para mesma granulometria, isso pode ser observado nas Figuras 52 e 53. Esse aspecto visual observado nos planos para mesma granulometria, provavelmente, está atribuído à disposição das células de raio ser diferente para ambos os planos, onde no plano tangencial essas células radiais iram apontar de frente com esse plano produzindo um aspecto visual mais homogêneo. No plano radial, as células radiais iram cruzar esse plano no sentido horizontal, causando um aspecto visual heterogêneo.

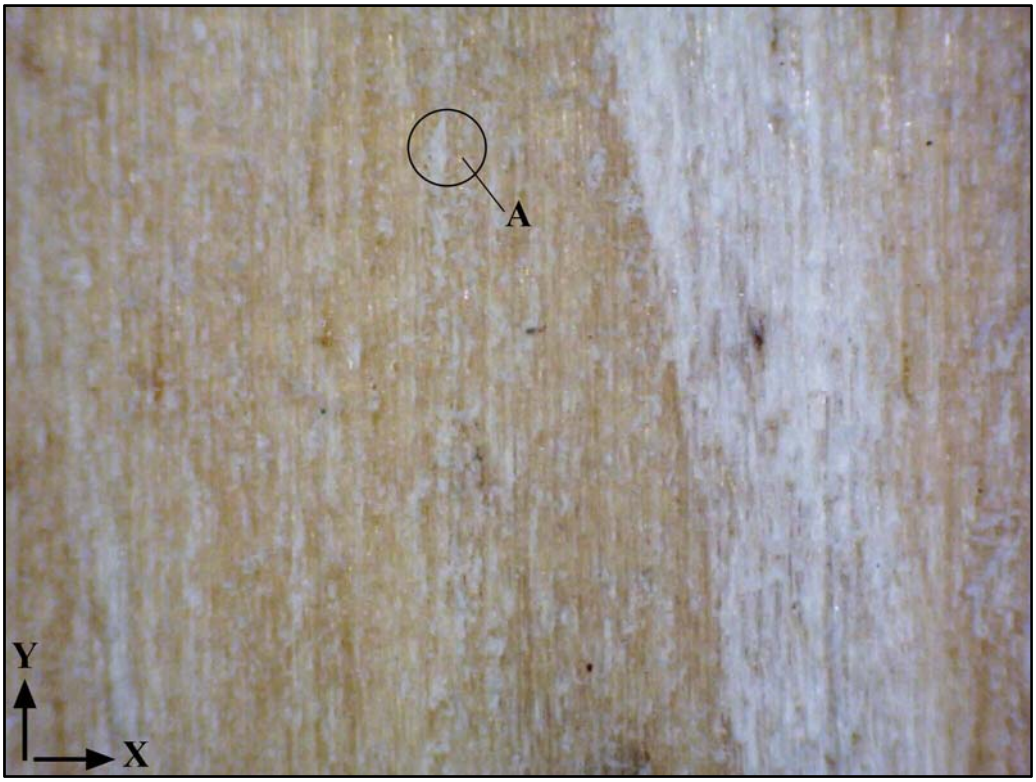

Figura 52- Superfície lixada com granulometria 80 mesh (plano tangencial), 50x

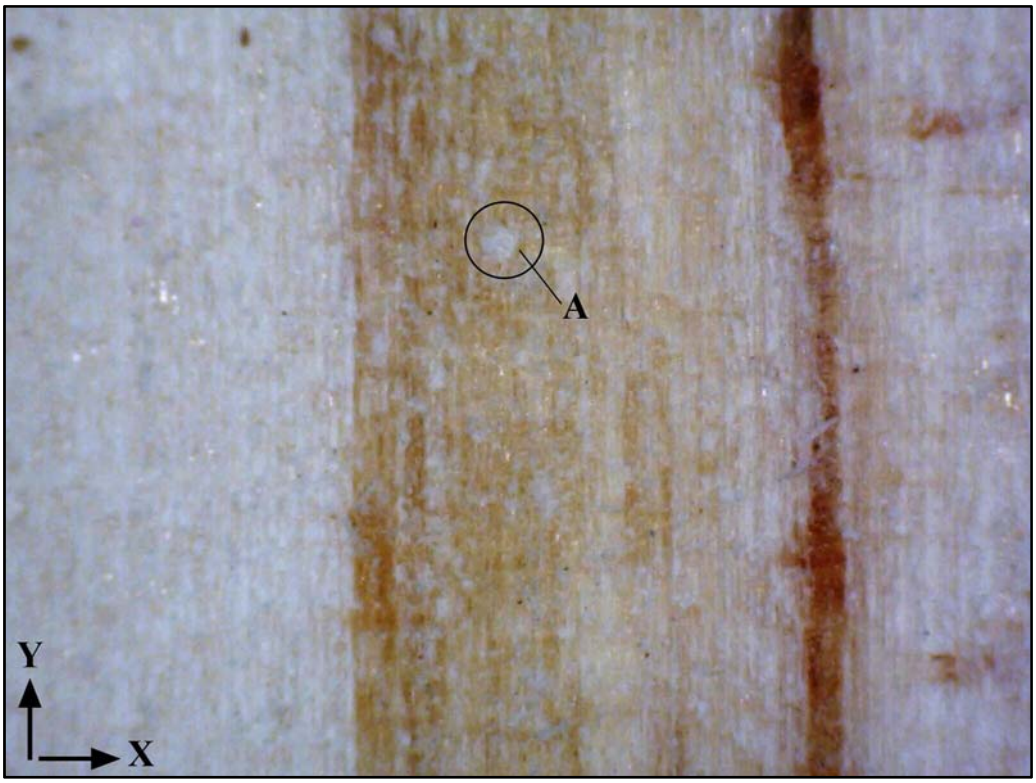

Figura 53 - Superfície lixada com granulometria 80 mesh (plano radial), 50x

Esse aspecto visual nos planos foi observado para todas as granulometrias utilizadas. Como não foi objetivo desse estudo verificar se existe diferença entre a rugosidade e os planos anatômicos, pois os mesmos foram lixados aleatoriamente, não foi possível confirmar numericamente se existe essa diferença observada nas Figuras 52 e 53.

As Figuras 54 e 55 ilustram a superfície lixada com granulometria 100 mesh nos planos tangencial e radial respectivamente. A orientação das fibras e o sentido que os grãos passaram sobre a superfície corresponde à direção (Y) indicada nas figuras. Quando se observa a superfície lixada com granulometria 100 mesh para ambos os planos notam-se diferenças entre as larguras dos vales (ex. circulo A) e redução dos picos se comparado com a superfície lixada com a granulometria 80 mesh. Observa-se nas Figuras 54 e 55 que os riscos provocados pelos grãos ficam mais visíveis e o espaçamento entre eles é menor se comparado a granulometria de 80 mesh (ver Figuras 52 e 53). Essa maior uniformização da superfície se deve a redução do tamanho do grão e aumento do número de grãos distribuídos ao longo da lixa, o que melhora o acabamento da superfície.

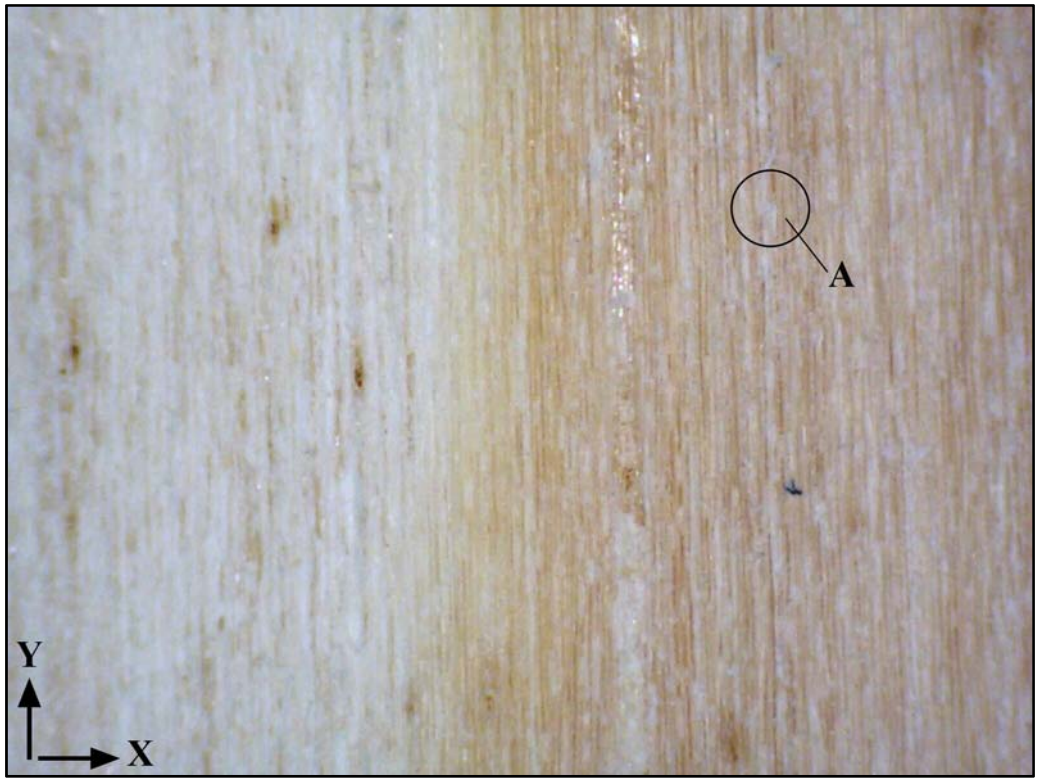

Figura 54 - Superfície lixada com granulometria 100 mesh (plano tangencial), 50x

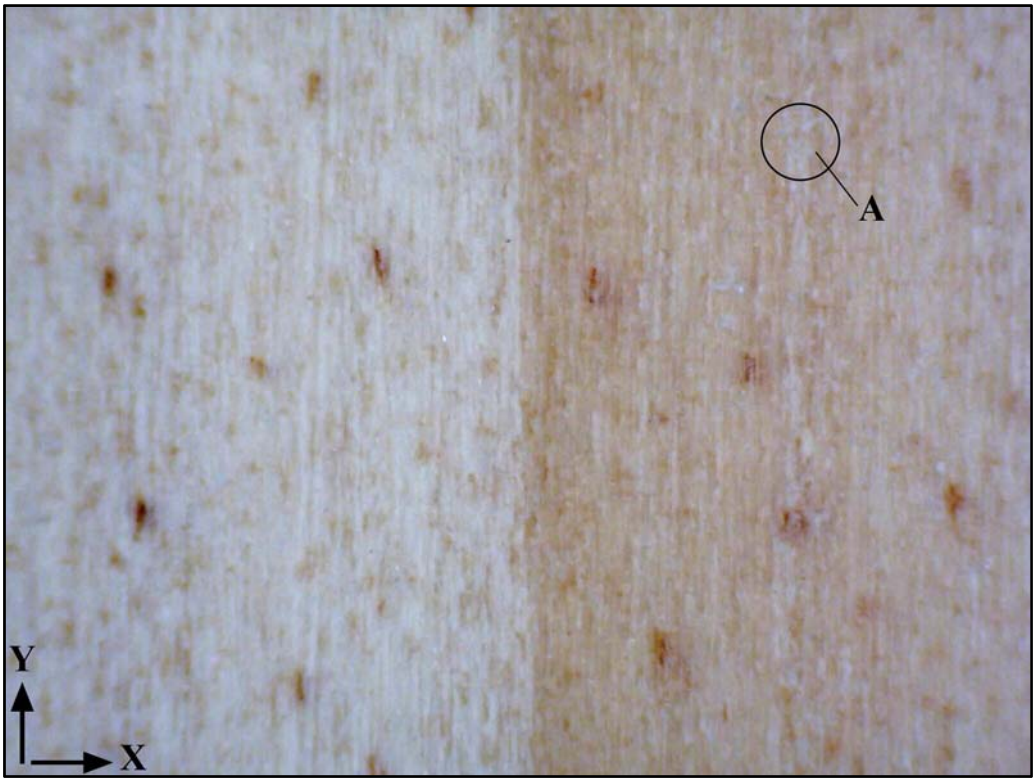

Figura 55 - Superfície lixada com granulometria 100 mesh (plano radial), 50x

As Figuras 56 e 57 ilustram a superfície lixada com granulometria 120 mesh nos planos tangencial e radial respectivamente. A orientação das fibras e o sentido que os grãos passaram sobre a superfície corresponde à direção (Y) indicada nas figuras. Se comparado visualmente o acabamento entre os planos tangenciais lixados com 100 e 120 mesh, nota-se pequena diferença entre os riscos produzidos pelos grãos que são um pouco menores e mais distribuídos ao longo da constituição da lixa em relação aos grãos de 100 mesh. Comparando os planos radiais lixados com granulometrias 100 e 120 mesh, pode-se notar o aparecimento de elementos anatômicos se sobrepondo aos riscos deixados pelo abrasivo que são quase imperceptíveis como indicado na Figura 57. O grande problema para medir a rugosidade com apalpador mecânico de determinadas espécies de madeira está relacionado sua anatomia, que muitas vezes se sobrepõe ao valor da rugosidade causada pelo processo de usinagem, assim mascarando os resultados de acabamento. Isso foi observado por Gurau *et al.* (2004) que criou rotinas de cálculos (filtros) para eliminar a influência de elementos anatômicos, propondo uma norma para medição da rugosidade na madeira através de apalpador mecânico.

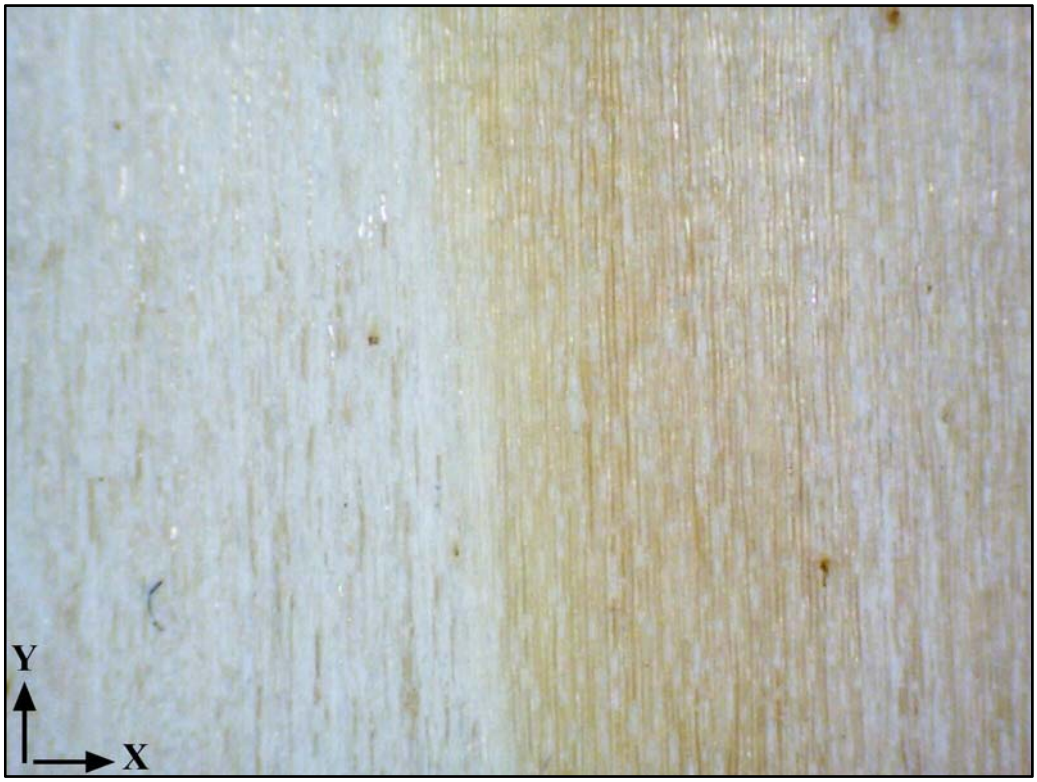

Figura 56 - Superfície lixada com granulometria 120 mesh (plano tangencial), 50x

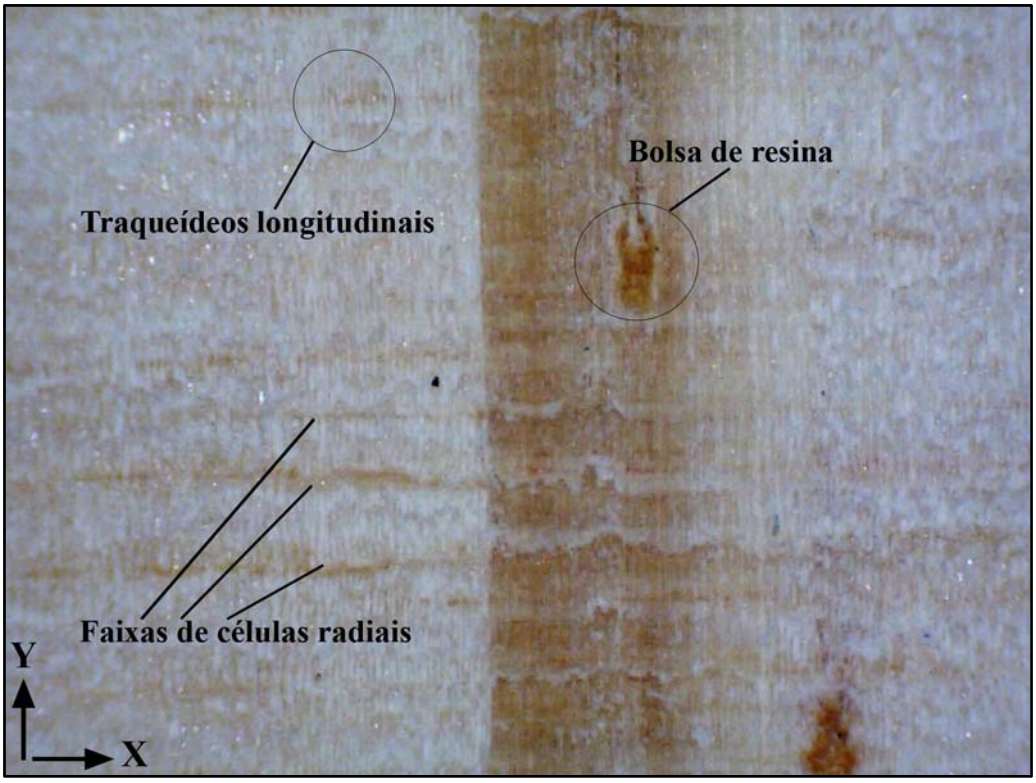

Figura 57 - Superfície lixada com granulometria 120 mesh (plano radial), 50x

As Figuras 58 e 59 ilustram a superfície lixada com granulometria 220 mesh nos planos tangencial e radial respectivamente. A orientação das fibras e o sentido que os grãos passaram sobre a superfície corresponde à direção (Y) indicada nas figuras. Observa-se nas figuras uma superfície homogênia, mas visualmente não se percebe diferenças entre as superfícies lixadas com granulometria 120 mesh (ver Figuras 56 e 57). Isso provavelmente deve-se a ampliação das Figuras 58 e 59 que foi de 50x, não permitindo notar as diferenças visuais no acabamento para granulometria 220 mesh em relação á superfície lixada com 120 mesh. Essa diferença foi notada numericamente através da rugosidade em relação à granulometria 120 mesh (Item 5.2.3).

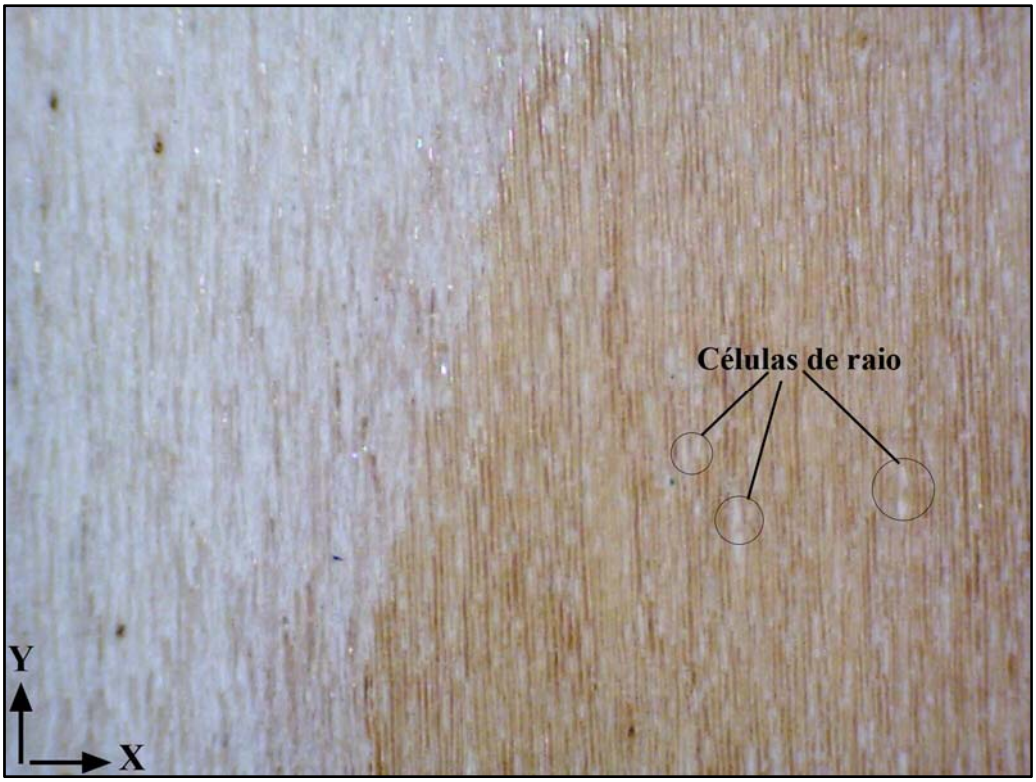

Figura 58 - Superfície lixada com granulometria 220 mesh (plano tangencial), 50x

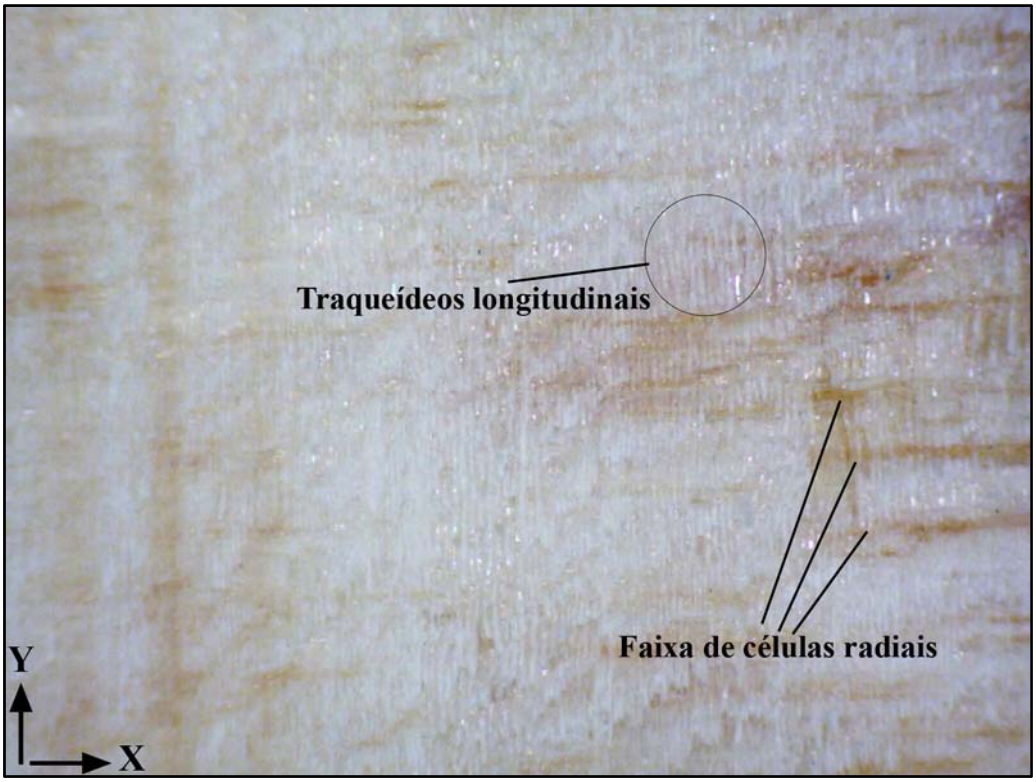

Figura 59 - Superfície lixada com granulometria 220 mesh (plano radial), 50x

5.2.8 Resumo dos resultados

A Tabela 27 apresenta um resumo dos resultados obtidos no experimento descritos nos tópicos acima. O sinal (+) indica que houve influência significativa do fator sobre a variável de saída mensurada. O sinal (-) indica que não houve influência significativa do fator sobre a variável de saída mensurada.

Tabela 27 – Resumo dos resultados das variáveis de saída

	VARIÁVEIS DE SAÍDA MENSURADAS					
FATORES	*MRR	*TEMP	*RUG	*POT	*FORC	*EA
Granulometria	+	+	+	-	+	+
Velocidade	+	-	-	+	-	-
Pressão	+	-	-	+	+	-
*Vel x Press	-	-	-	-	-	-

*MRR – Taxa de remoção de material, TEMP – Temperatura, RUG – Rugosidade, POT – Potência, FORC – Força, EA – Emissão Acústica, Vel x Press – Interação entre velocidade e pressão.

6 CONCLUSÕES

Em função da combinação dos fatores pressão e velocidade de corte nos blocos obtiveram-se as seguintes conclusões sobre as variáveis respostas (taxa de remoção de material, temperatura, rugosidade, potência, força e emissão acústica) no processo de lixamento plano de *Pinus elliottii*:

- Não foram encontradas interações entre os fatores pressão e velocidade de corte com relação a todas as variáveis respostas mensuradas no experimento;

- Com relação à taxa de remoção de material observou-se um efeito significativo do bloco sobre taxa remoção, no qual para granulometrias mais grossas tem-se uma maior remoção de material com tendência de diminuição da remoção para granulometrias mais finas. Os fatores pressão e velocidade influem sobre taxa de remoção elevando-a de forma crescente à medida que os níveis dos fatores são elevados;

- Para temperatura no lixamento o bloco foi significativo na alteração da temperatura, com uma tendência de crescimento conforme se aumenta as granulometrias. Essa tendência está relacionada à redução na remoção de material dos grãos menores (granulometrias mais finas) e menor espaçamento entre eles o que gera maior temperatura devido ao maior atrito. Para os fatores velocidade e pressão, nos níveis testados, não influenciaram significativamente na temperatura de lixamento;

- O acabamento superficial sofreu influência significativa apenas do bloco. Para granulometrias mais grossas têm-se piores rugosidades e para granulometrias mais finas têm-se melhores rugosidades. Atribuem-se a utilização de granulometrias mais grossas a remoção de imperfeições provindas de falhas do processo que antecede o lixamento ou falhas naturais provindas da madeira e a remoção de material para ajustes nas dimensões da peça lixada. A utilização de

granulometrias mais finas está associada ao acabamento da superfície, apenas utilizada para uniformização em menor escala se comparado as granulometrias mais grossas. No presente estudo tanto a velocidade como pressão não influenciaram significativamente na rugosidade da superfície lixada, mostrando que apenas a granulometria da lixa afeta no acabamento superficial da espécie estudada;

- Para o consumo de potência o bloco não afetou de forma significativa. Tanto para velocidade como para pressão, nos níveis estudados, houve uma influência significativa sobre o consumo de potência, onde ambos os fatores tiveram uma tendência linear crescente no consumo de potência;

- Para força de lixamento o bloco foi significativo. A velocidade de corte não influenciou sobre a força lixamento de forma significativa ao contrário da pressão que mostrou ter influência sobre a mesma;

- Para emissão acústica, apenas o bloco influenciou significativamente no sinal captado. Observaram-se maiores sinais para granulometrias mais grossas e menores sinais para granulometrias mais finas;

- Com relação à integridade superficial, notou-se uma diferença visual entre o plano tangencial e radial para uma mesma granulometria com relação ao acabamento, atribuindo-se a essa diferença a disposição de elementos anatômicos em ambos os planos de corte da madeira. Visualmente o plano tangencial possui melhor acabamento e homogeneidade em relação ao plano radial, mas seria necessário confirmar essa hipótese através de uma análise mais detalhada que possa afirmar essa diferença numericamente, o que não foi o propósito desse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELLAN-NEBOT, J. V.; SUBIRÓN, F. R. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. **Advanced Manufacturing Technology**, v.47, n.1-4, p.237-257, jun. 2009.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. Princípios de engenharia de fabricação mecânica: **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1977. p. 312.

ALVES, M.C.S. **Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN**. 2007. 175p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais - Área de Processamento de Materiais) – Faculdade de Ciências do *campus* de Bauru, UNESP, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2007.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO G. A. **Extensometria Básica**. 2004. 45p. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14960**: Abrasivos revestidos - Lixas - Requisitos de segurança para seu uso. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil-Termos, definições e parâmetro da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: Método do perfil-Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda***. Árvore**, v.27, n.3, p. 371-380, dez. 2003.

BLUM, T.; INASAKI, I. A study on Acoustic Emission from the orthogonal cutting process. **Journal of Engineering for Industry**.v.112, p.203-211, aug.1990.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira.** São Paulo: Ed. Nobel, 1991. 154p.

CARVALHO, J. S.; ROCCO LAHR, F. A. Contribuição para a definição de critérios para o dimensionamento da ligação entre peças estruturais de madeira por chapas metálicas com dentes estampados. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 36, p. 49-63, 2007.

CARPINETTI, L. C. R.; GONÇALVES FILHO, E. V.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G. **Rugosidade Superficial**: Conceitos e Princípios de Medição. São Carlos: Apostila, p. 51, Seção de Publicações da EESC-USP, 1996.

CARRANO, A. **Quantification of effect of process parameters and their interactions with respect to material removal rate and surface roughness for a wood sanding process in the furniture making industry**. 1997. Thesis (Master in Industrial Engineering Department) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 1997.

CAMARGO, D. R. **Desenvolvimento de um protótipo de uma prótese antropomórfica para membros superiores**. 2008. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CISNEROS, C. A. F. **Uma contribuição à instrumentação para o monitoramento do processo de fresamento de topo**. 2006. 115p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

D'ALMEIDA, M. L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. **In: Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** 2.ed. São Paulo, IPT-SENAI, 1988. v. 1, Cap. 3.

DORNFELD, D. The role of acoustic emission in manufacturing process monitoring. Sensor Technology for Untended Manufacturing. Schaumburg. **Society of Manufacturing Engineers**, Chicago, 1984.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1977. p. 485.

FOELKEL, C**. Paisagens em Anatomia da Madeira**. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/fotos_madeira.html>. Acesso em: 28 out. 2010.

FOTIN, A.; CISMARU, I.; SALCĂ, E. A. Experimental research concerning the power consumption during the sanding process of birch wood. **ProLigno**, v.4,n. 3,p.37- 45, sep. 2008.

FPL - FOREST PRODUCTS LABORATORY . Wood handbook: **Wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999. 463 p.

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

GERALDO, J. Z. IPT (Org.). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo, 2009. 99 p.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIANS, H.; IRLE, M. Processing roughness of sanded wood surface. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v.63, n. 1, p. 43-52, Nov.2004

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

HAWKS, L. K. **Wood Finishing and Refinishing**: Sanding. Disponível em: <http://extension.usu.edu/files/publications/publication/HI_26.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2010.

JAVOREK, L.; HRIC, J., VACEK, V. The study of chosen parameters during sanding of spruce and beech wood. **ProLigno**, v. 2, n.4, p.1-11, dec.2006.

JEMIELNIAK, K. Commercial Tool Condition Monitoring Systems. **Advanced Manufacturing Technology**, v.15, n.10, p.711-721, sep.1999.

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

LEMASTER, R. L. **Development of an Optical Profilometer and the Related Advanced Signal Processing Methods for Monitoring Surface Quality of Wood Machining Applications**. 2004. 254p. Thesis (PhD) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2004.

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

LANÇONI, P. N.; BOSO, D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Estudo comparativo da força de corte no processo de retificação. In: **XII SIMPEP**, Bauru, 2005.

LEE, E. S.; KIM, N. H. A. Study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor. **International Journal of Machining Tools & Manufacture**. v. 7, n. 41, p. 937-915, may. 2001.

LIMA, J. E. **Monitoramento do corte de dentes de engrenagem com ferramenta hob via corrente elétrica do motor da máquina**. 1995. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica do *Campus* da Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

MAHR (Germany). **Perthometer**: Surface Texture Parameters. Disponível em: <http://www.universalmeasurement.com/MahrFederalFinish.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2010.

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

MANNAN, M. A.; BROMS, S. “Investigation into Temperature Dependence of Motor Current Measurements Applied to Monitoring and Adaptive Control”, In: **Annals of CIRP**, v.41, n.1,1992.

MAHMOUD, A. G. E.; VIRILLO, C. B.; RIBEIRO, D. B.; ALCANTARA, S. F. **Invasão de "*Pinus elliottii*" em um fragmento de Cerrado em Itirapina - SP**, Campinas - SP, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

MATSUMOTO, H.; MURASE, Y. Acoustic emission characteristics in wood sanding amplitude distribution of acoustic emission in disc sanding process. **Journal of the Faculty of Agriculture**, Kyushu University. n.43, p.257-268, 1998.

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

NORTON. **Informativo técnico**: tipos de costado em lixas. 2003. p.2 Disponível em : < http://www.norton-abrasivos.com.br/documentfinder.aspx#>

NORTON. **Informativo técnico**: tipos de emendas para lixas. 2003. p.2 Disponível em:
< http://www.norton-abrasivos.com.br/documentfinder.aspx#>

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1994.

NUSSBAUM, Ch. N. **Rebolos & Abrasivos**: tecnologia básica. São Paulo: Ed. Ícone, 1988. 503 p.

PARK, J.; MACKAY, S. **Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems**. London: Ed. Elsevier, 2003. 407 p.

PAHLITZSCH, G. International state of research in the field of sanding. **Holz als Roh-und Werstoff**. v.18, p.330 -343, 1970.

PORANKIEWICZ, B.;BANSKI, A.; WIELOCH, G. Specific resistance and specific intensity of belt sanding of wood. **BioResources**. v. 5, n.3, p. 1626-1660, 2010.

RANZ, N. C., HINKEN, E. W. Machining wood with coated abrasives. J**our. For. Prod. Res. Soc**. v.4, n. 5, p. 251-254, 1954

RATNASINGAM, J.; REID, H. F., PERKINS, M. C. The productivity imperatives in coated abrasives: Application in furniture manufacturing. **Holz als Roh - und Werkstoff.** v.57, n. 2, p. 117-120, apr. 1999.

RATNASINGAM, J.; REID, H. F., PERKINS, M. C. The abrasive sanding of Rubberwood (*Hevea brasiliensis*): an industrial perspective. **Holz als Roh - und Werkstoff.** v. 60, n. 3, p. 191-196, jun. 2002.

RATNASINGAM, J.; SCHOLZ, F. **Wood sanding process: An optimization perspective**. Kuala Lumpur-Malaysia. Faculty of Forestry, Universiti Putra Malaysia, Fachberich Holztechnik, Fachhochschule Rosenheim, Germany. 115p, 2004.

RATNASINGAM, J.; SCHOLZ, F.; NATTHONDAN, V.; GRAHAM, M. Dust-generation characteristics of hardwoods during sanding processes. **European Journal of Wood and Wood Products**. v. 68, Jan. 2010.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal,** v.10, n.1, p.85-93, 2000.

SALONI, D. E. **Process Monitoring and Control System Design, Evaluation and Implementation of Abrasive Machining Processes**. 2007. 197 p. Thesis (PhD) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2007.

STEWART, H. A comparison of factors affecting power for abrasive and knife planning of hardwoods. **Forest Product Journal**.v.24,n.3,p.31-34, 1974.

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**, v.55, n. 12, p.35-52, dec.2005.

SCHULTZ, A. R. **Botânica Sistemática**, Porto Alegre, RS, 1968, Globo, 3 ed. p. 427.

SHIMIZU, J.Y.; MEDRADO, M. J. S. **Cultivo de Pinus**. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 28 out. 2010.

SILVA, M, R. **Determinação da permeabilidade em madeiras de florestas plantadas.** São Carlos, 2007. 135p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2007.

SOISSON, H. E. **Instrumentação Industrial.** Curitiba: Ed. Hemus, 2002. 687 p.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. **Máquinas e Metais, Ano XXXVIII**, n. 436, p. 140 - 157, 2002.

STEMMER, C, E. **Ferramentas de corte II**: Brocas, Alargadores, Ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. Santa Catarina: Ed. UFSC, 1992. 314 p.

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.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais:** Fundamentos e Aplicações. 5. ed. São Paulo: Érica, 2008. 221 p.

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

VARANDA, L. D.; ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T. T.; SATIAGO, L. F. F. Influência das varáveis no lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**. v.16, Suplemento, p. 23-32, 2010.

WEBSTER, J. A.; DONG, W. P.; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process**.** In: **Annals of the CIRP**, vol. 45, n. 1, p. 335-340, 1996.

WINTER (Brasil). Catálogo produtos: **Superabrasivos. Rebolos diamantados e CBN**. Disponível em: <www.winter.com.br>. Acesso em: 05 set. 2010.

APÊNDICE A - ANÁLISE FÍSICA DA MADEIRA

Resultados das análises físicas da espécie *Pinus elliottii*

Tabela A.1 - Valores das dimensões, massas e densidades aparentes a 12% umidade das mostras de madeira de *Pinus elliottii*

*Nº	Esp. (mm)	Larg. (mm)	Comp. (mm)	Área (cm^2)	Massa (g)	D_{ap} ($kg.m^{-3}$)
148	22,30	53,65	30,10	16,15	16,8587	468,15
795	23,55	54,25	30,35	16,46	23,0894	595,47
508	22,40	53,90	30,00	16,17	19,3189	533,36
409	22,45	53,75	30,15	16,21	21,2707	584,65
574	22,95	54,10	30,25	16,37	22,8240	607,70
428	22,60	53,30	30,20	16,10	17,2510	474,21
114	22,40	53,80	30,25	16,27	23,4428	643,06
241	22,95	53,55	30,05	16,09	15,2597	413,20
481	22,90	53,25	30,05	16,00	19,8959	542,96
808	22,85	54,40	30,20	16,43	21,0702	561,28
660	22,95	54,15	30,30	16,41	22,7601	604,44
640	22,85	53,90	30,20	16,28	21,1704	569,18
313	22,55	53,30	29,80	15,88	17,6715	493,38
30	22,30	53,30	29,95	15,96	20,4073	573,27
439	22,95	53,85	29,95	16,13	18,8664	509,71
186	22,55	53,55	30,00	16,07	19,3616	534,46
274	22,35	53,80	30,10	16,19	22,7055	627,34
602	23,20	54,30	30,15	16,37	26,2841	692,02
320	22,85	53,85	29,90	16,10	18,8496	512,34
626	23,55	54,45	30,15	16,42	21,2353	549,27

*N – corresponde ao número da amostra retirada aleatoriamente

Tabela A.2 - Valores das densidades básicas das mostras de madeira de *Pinus elliottii*

*Nº	*m_v (g)	*m_i (g)	*m_s (g)	D_b (kg.m^{-3})
352	43,01	5,37	15,7250	417,77
18	42,55	4,72	14,1732	374,66
16	42,93	4,98	14,7300	388,14
13	44,49	5,7	17,7429	457,41
15	43,47	4,81	14,2748	369,24
703	47,73	7,22	20,7570	512,39
378	43,96	5,81	16,8538	441,78
120	44,27	5,73	16,6182	431,19
9	24,31	3,47	9,9984	479,77
11	43,21	4,64	13,1845	341,83
19	43,41	4,66	13,8629	357,75
794	48,5	7,75	22,2698	546,50
12	43,15	4,69	13,8664	360,54
86	44,09	5,42	16,0362	414,69
389	45,04	6,37	18,3560	474,68
351	44,79	5,78	17,1868	440,57
10	43,41	4,68	13,9294	359,65
4	27,53	4,26	12,2359	525,82
115	44,99	6	17,2557	442,57
17	43,34	5,55	16,6203	439,81
14	43,02	4,43	13,7001	355,02
3	20,55	2,99	8,5777	488,48
7	24,49	3,99	11,4754	559,78
101	23	3,47	9,9776	510,89
2	25,14	3,66	10,4803	487,91
783	46,49	6,65	19,1458	480,57
8	21,73	3,03	8,6968	465,07
1	25,4	3,77	10,8714	502,61
6	20,8	3,07	8,8234	497,65
5	24,58	3,95	11,3560	550,46

*N - corresponde ao número da amostra retirada aleatoriamente, m_s - massa de amostra seca, m_v - massa de amostra saturada em água, m_i - massa de amostra saturada imersa em água.

APÊNDICE B - RESULTADO DO LIXAMENTO

Resultados do lixamento da madeira de *Pinus elliottii*

Tabela B.1 - Valores da Taxa de Remoção de Material ($cm^3 . s^{-1}$)

	*C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
*Nº	Bloco 1 (G80)								
1	0,394	0,568	0,575	0,537	0,617	0,673	0,477	0,677	0,933
2	0,308	0,453	0,548	0,505	0,606	0,496	0,435	0,755	0,570
3	0,311	0,474	0,482	0,294	0,541	0,583	0,522	0,622	0,509
4	0,309	0,393	0,453	0,463	0,610	0,538	0,587	0,646	0,631
5	0,394	0,379	0,446	0,331	0,437	0,709	0,383	0,729	0,669
6	0,297	0,439	0,632	0,393	0,670	0,579	0,416	0,563	0,808
Nº	Bloco 2 (G100)								
1	0,227	0,441	0,350	0,347	0,368	0,450	0,317	0,551	0,584
2	0,279	0,549	0,452	0,267	0,395	0,572	0,411	0,400	0,637
3	0,173	0,536	0,508	0,372	0,521	0,561	0,507	0,399	0,356
4	0,436	0,394	0,516	0,318	0,727	0,431	0,341	0,553	0,757
5	0,278	0,360	0,540	0,430	0,488	0,398	0,409	0,453	0,716
6	0,140	0,331	0,277	0,153	0,529	0,564	0,085	0,141	0,509
Nº	Bloco 3 (G120)								
1	0,220	0,299	0,369	0,312	0,318	0,298	0,430	0,394	0,528
2	0,214	0,389	0,470	0,355	0,488	0,501	0,360	0,700	0,477
3	0,289	0,332	0,640	0,292	0,493	0,482	0,607	0,463	0,660
4	0,138	0,134	0,250	0,328	0,264	0,305	0,262	0,388	0,388
5	0,169	0,331	0,347	0,275	0,449	0,401	0,303	0,507	0,478
6	0,170	0,179	0,461	0,199	0,262	0,286	0,343	0,446	0,478
Nº	Bloco 4 (G220)								
1	0,051	0,086	0,071	0,053	0,078	0,113	0,080	0,103	0,115
2	0,056	0,083	0,081	0,098	0,100	0,099	0,092	0,175	0,114
3	0,101	0,092	0,272	0,097	0,116	0,220	0,123	0,159	0,298
4	0,080	0,072	0,077	0,083	0,169	0,185	0,092	0,217	0,145
5	0,051	0,130	0,117	0,127	0,148	0,148	0,095	0,186	0,190
6	0,103	0,131	0,129	0,096	0,165	0,115	0,161	0,083	0,216

*Nº - numero de repetições em cada bloco, C_n – combinações possíveis dentro cada bloco

Tabela B.2 - Valores das Temperaturas no lixamento (ºC)

	*C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
*Nº	Bloco 1 (G80)								
1	75,3	62,9	71	62,1	67,1	76,9	72,9	70,4	69,3
2	81,7	80,7	69,8	68,5	68,6	83,3	76,4	74,4	86,4
3	81,6	68,8	82	73,9	77,6	84,6	68,2	75,4	86,1
4	76,3	80,7	82,8	69,5	69,6	92,5	70,4	82,1	78,3
5	68	82,8	75,5	76,8	78,3	71,9	70,7	70,6	77,3
6	79	66,5	68,5	73	69	76,5	82,3	84	77,2
Nº	Bloco 2 (G100)								
1	81,3	64,7	95,2	80	76,3	85,6	89,6	72,1	74,9
2	73,4	66,3	79,7	91,1	92,4	74,2	69,5	92,2	80,4
3	70,5	62,3	71,2	77,2	72,9	80	66,6	70,4	80,9
4	64,5	83,3	74,6	86,6	67,6	75,5	82,4	87,7	76,5
5	82	82,4	72,8	68,8	71,6	85	78	76,3	77,5
6	81,7	76,3	74,1	72,7	64,1	64,7	83,5	89,7	71,9
Nº	Bloco 3 (G120)								
1	88,4	69,6	73,9	77,4	80,7	79,4	66,9	73,9	74,5
2	81,7	64,6	67,2	82,2	69,7	72,2	71,9	69,7	88,4
3	60,3	82,6	72,1	71,5	66,9	85,4	60,5	71,6	72,7
4	75,6	82,5	90,2	60,9	87,7	90,8	86,7	79,5	74,7
5	68,2	68,5	74,5	67,8	67,2	78,5	67,8	67	83,2
6	81,2	86,9	64,7	84,1	92,3	90,9	71,7	70,2	78,2
Nº	Bloco 4 (G220)								
1	76,8	82,1	87,4	90,6	87,2	77,5	95,6	100,1	79,5
2	85,4	81,1	98,2	88	84,5	99,7	90,8	77,4	113,7
3	84,7	77,3	67,4	79,3	90,6	70,7	88,8	88,7	71,5
4	75,4	74,9	75	76,1	75,2	82,6	86,2	87,1	94,5
5	67,8	83,3	74,3	76,4	83,9	71,6	89	57,1	94,3
6	72,1	77,9	84,6	87,9	73,7	82,7	78,8	82,2	92,8

*Nº - numero de repetições em cada bloco, C_n – combinações possíveis dentro cada bloco

Tabela B.2 - Valores das Rugosidades no lixamento (Ra)

	*C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
*Nº	Bloco 1 (G80)								
1	9,55	8,83	7,12	8,63	9,74	9,06	9,59	10,44	8,52
2	7,14	8,15	6,94	7,91	7,20	7,02	9,75	7,69	7,19
3	9,23	8,62	9,32	8,21	9,58	9,54	8,89	9,26	8,82
4	8,08	8,23	8,32	7,97	7,89	7,32	8,27	8,06	6,85
5	7,85	8,38	6,99	8,31	8,22	8,46	8,63	8,62	6,62
6	7,38	6,91	8,39	6,93	6,29	8,36	6,81	9,68	8,87
Nº	Bloco 2 (G100)								
1	5,67	5,90	5,99	6,36	6,24	6,29	5,38	5,83	4,24
2	5,79	6,37	5,78	6,27	6,17	5,58	6,26	5,69	5,49
3	7,19	6,66	6,94	7,21	7,39	6,48	6,15	7,00	6,57
4	7,11	7,74	7,22	7,64	5,77	6,10	6,24	6,69	7,12
5	5,61	5,76	6,21	5,39	6,09	5,54	6,42	4,97	6,15
6	6,19	6,59	5,30	5,88	7,17	5,78	6,67	6,32	5,43
Nº	Bloco 3 (G120)								
1	4,54	5,18	4,12	6,51	4,53	4,76	4,98	5,73	6,40
2	5,22	4,65	4,56	5,11	5,13	4,52	5,70	5,43	5,44
3	5,00	5,80	5,09	5,40	5,60	5,44	5,73	5,50	5,02
4	7,05	5,97	7,11	5,81	6,20	7,25	7,52	7,00	5,64
5	5,11	4,98	5,77	4,87	4,81	5,09	5,21	4,39	4,56
6	5,98	5,31	4,99	5,13	5,89	5,40	5,44	4,70	5,19
Nº	Bloco 4 (G220)								
1	3,56	3,04	3,58	2,96	3,31	3,12	3,34	2,39	3,08
2	2,37	3,15	2,83	4,94	2,21	2,31	2,76	2,50	3,88
3	2,31	3,02	3,88	4,45	3,61	2,86	2,90	3,59	3,37
4	3,53	2,83	2,85	4,51	3,03	3,10	3,79	3,94	3,70
5	3,41	2,64	3,10	2,97	3,19	2,85	2,81	3,57	2,98
6	2,87	2,98	3,85	3,76	3,84	5,35	3,63	2,70	3,52

*Nº - numero de repetições em cada bloco, C_n – combinações possíveis dentro cada bloco

Tabela B.2 - Valores das Potências no lixamento (Watts)

	*C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
*Nº	Bloco 1 (G80)								
1	172,49	182,70	408,11	218,60	215,85	253,24	252,32	261,61	310,18
2	165,57	169,01	205,88	179,64	201,41	243,23	377,13	247,01	289,50
3	160,34	159,49	200,33	192,53	218,06	261,17	311,09	242,91	233,61
4	136,26	144,03	173,27	165,15	170,60	219,31	367,61	215,70	256,74
5	163,06	167,06	206,08	205,28	365,24	242,02	217,01	419,51	261,84
6	172,79	168,43	224,13	192,29	206,93	271,48	231,25	256,96	484,91
Nº	Bloco 2 (G100)								
1	164,31	186,13	203,11	202,41	384,24	242,55	235,24	245,36	285,39
2	176,09	207,43	211,80	218,58	222,86	264,02	424,60	253,42	317,30
3	146,83	164,13	192,21	186,68	382,27	219,43	236,43	233,60	268,58
4	281,82	159,16	201,55	209,78	192,40	230,59	246,46	233,47	288,21
5	184,62	182,75	206,10	218,91	402,62	240,84	274,32	255,15	289,80
6	155,10	363,03	196,76	215,62	211,85	260,26	277,36	265,30	307,20
Nº	Bloco 3 (G120)								
1	154,41	166,28	179,09	201,96	192,22	228,41	239,35	228,36	484,83
2	193,91	244,35	234,11	246,24	250,31	280,80	316,68	488,23	341,99
3	150,96	161,04	174,41	186,69	187,78	238,20	403,64	220,63	259,03
4	198,22	190,06	184,11	434,37	231,98	230,44	280,63	292,23	316,44
5	159,89	165,86	207,99	241,28	195,20	240,06	220,76	411,05	285,02
6	194,94	165,59	236,45	209,92	205,34	364,69	279,35	278,95	279,28
Nº	Bloco 4 (G220)								
1	177,16	197,60	251,93	244,68	225,08	234,57	257,47	244,63	414,71
2	214,14	181,64	294,68	328,33	247,88	277,85	301,33	237,91	332,43
3	185,41	218,93	289,11	183,14	178,06	209,62	252,51	222,03	241,60
4	163,62	178,79	175,81	260,64	200,82	236,55	262,49	392,78	317,19
5	177,24	316,33	195,10	366,34	193,47	238,05	282,90	195,11	281,90
6	158,95	170,11	209,18	236,49	297,09	227,36	245,46	243,05	276,70

*Nº - numero de repetições em cada bloco, C_n – combinações possíveis dentro cada bloco

Tabela B.2 - Valores das Forças no lixamento (Newton)

	*C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
*Nº	Bloco 1 (G80)								
1	13,99	14,21	17,19	18,11	17,21	16,89	18,78	19,69	21,03
2	10,67	11,51	12,94	14,41	14,24	12,54	18,47	18,38	15,41
3	13,99	14,39	13,75	13,26	17,49	17,17	20,77	19,75	16,72
4	9,51	10,53	11,00	13,81	16,19	13,03	21,12	16,15	15,15
5	13,23	10,37	11,43	12,76	15,48	16,04	16,00	20,41	16,95
6	10,82	11,44	14,02	14,12	14,82	14,40	15,92	16,91	21,65
Nº	Bloco 2 (G100)								
1	12,88	14,32	12,99	16,02	17,08	15,21	17,37	18,32	18,07
2	10,97	14,20	11,55	11,94	12,51	14,77	18,72	14,03	18,53
3	13,14	16,26	15,78	17,05	20,15	17,44	20,49	16,89	14,20
4	15,45	12,57	14,04	13,98	17,69	14,13	16,20	19,68	20,21
5	11,87	13,13	14,53	15,31	18,31	13,54	18,37	16,17	20,34
6	9,67	14,78	9,67	10,53	16,08	15,09	11,19	11,64	15,83
Nº	Bloco 3 (G120)								
1	11,83	12,50	12,01	15,94	15,10	11,38	19,53	16,76	20,56
2	11,10	13,14	12,82	13,73	15,31	13,79	19,07	23,02	16,66
3	13,46	15,35	14,06	15,13	17,61	17,89	24,08	18,19	21,97
4	13,08	9,86	14,15	17,01	21,43	15,52	17,24	17,12	16,73
5	10,99	11,88	12,18	14,35	14,91	13,86	14,58	21,21	17,07
6	10,95	9,36	14,84	12,22	12,44	14,04	16,53	17,08	16,20
Nº	Bloco 4 (G220)								
1	9,80	10,69	9,20	11,71	12,50	12,14	13,32	12,99	16,27
2	5,95	8,98	6,77	13,18	9,66	9,77	8,85	13,49	9,16
3	12,58	10,47	15,66	13,18	12,65	15,03	15,69	16,89	18,47
4	10,14	8,93	8,13	12,97	12,45	12,20	12,45	18,41	16,31
5	8,28	12,31	9,35	19,46	12,54	11,59	16,51	17,56	14,42
6	9,27	9,81	9,55	10,46	13,86	10,11	15,49	10,90	14,13

*Nº - numero de repetições em cada bloco, C_n – combinações possíveis dentro cada bloco

Tabela B.2 - Valores das EAs no lixamento (Volts)

	*C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
*Nº	Bloco 1 (G80)								
1	4,59	5,13	4,49	4,22	5,43	4,60	4,41	5,48	4,23
2	4,87	4,92	4,79	4,82	4,82	5,05	4,97	4,95	5,03
3	4,40	4,63	5,19	4,47	4,75	4,48	4,31	4,84	4,82
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nº	Bloco 2 (G100)								
1	4,36	5,18	4,49	4,22	4,47	4,72	5,29	4,27	5,13
2	5,06	4,45	4,72	4,57	4,93	4,64	4,98	4,88	5,21
3	4,31	4,54	4,25	4,14	4,64	4,61	4,15	4,17	4,55
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nº	Bloco 3 (G120)								
1	4,43	4,81	4,73	4,62	4,87	4,40	4,89	5,42	4,81
2	4,71	4,51	4,31	5,00	4,56	4,40	4,75	5,16	4,27
3	4,21	4,27	5,01	4,16	4,39	4,62	4,32	4,45	4,46
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nº	Bloco 4 (G220)								
1	4,11	4,13	4,11	4,62	4,11	4,12	4,24	4,13	4,16
2	4,53	4,55	4,14	4,08	4,36	4,48	4,11	4,54	4,08
3	4,16	4,29	4,15	4,17	4,18	4,21	4,17	4,17	4,21
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Nº - numero de repetições em cada bloco, C_n – combinações possíveis dentro cada bloco