UNESP
Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá

EFEITOS DA GRANULOMETRIA, DO DESGASTE E DO TIPO DE MATERIAL ABRASIVO NO LIXAMENTO PLANO DE MADEIRAS

Guaratinguetá
2014

FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM

EFEITOS DA GRANULOMETRIA, DO DESGASTE E DO TIPO DE MATERIAL ABRASIVO NO LIXAMENTO PLANO DE MADEIRAS

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

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Varasquim, Francisco Mateus Faria de Almeida
V288e Efeitos da granulometria, do desgaste e do tipo de material abrasivo no lixamento plano de madeiras / Francisco Mateus Faria de Almeida Varasquim. – Guaratinguetá : [s.n.], 2014
157 f. : il.
Bibliografia: f. 149-157

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

1. Óxido de alumínio 2. Óxido de zircônio I. Título

CDU 546.62

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador / UNESP/FEG

Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP/FEG

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
UNESP/BAURU

Prof. Dr. IVALDO DOMÊNICO VALARELLI
UNESP/BAURU

Prof. Dr. FABIO MINORU YAMAJI
UFSCAR

Junho de 2014

DADOS CURRICULARES

FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM

NASCIMENTO	26.03.1985 - MORRINHOS/GO
FILIAÇÃO	Luiz Rogério Varasquim Célia Regina de Almeida
2004/2009	Curso de graduação em Engenharia Industrial Madeireira - Universidade Estadual Paulista Campus de Itapeva/SP.
2009/2011	Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, nível de Mestrado, na Faculdade de Ciências do Campus de Bauru da Universidade Estadual Paulista.
2011/2012	Professor concursado no curso de Técnico em Industrial Madeireiro no Centro Paula Souza Campus Itapeva/SP.
2011/2014	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2012/2012	Professor contratado na disciplina de Pesquisa Operacional para o curso superior de Sistemas da Informação na FAIT (Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva) em Itapeva/SP.
2012/atual	Professor efetivo na área de Indústria/Mecânica no IFSP (Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo) *Campus* de Itapetininga/SP.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Célia Regina de Almeida, por sua total dedicação, amor e apoio em todos os momentos. Tenho certeza que a senhora é a melhor mãe do mundo.

ao meu orientador Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves por toda sua paciência, incentivo, dedicação e auxílio iniciados na graduação e que permaneceram até este doutorado. Meus sinceros agradecimentos pois, sem a sua assistência este trabalho não seria concluído.

ao meu pai, Luiz Rogério Varasquim, pelos ensinamentos e conversas e tudo que pude absorver deles.

aos técnicos de laboratório Tiago Matos Andrés e Juscelino de Jesus Pereira Melo pelos auxílios durante toda a parte experimental e conversas de corredor, com certeza vocês foram muito importantes para a realização desse trabalho.

ao David José Tenório de Aquino que além de me auxiliar durante os ensaios, também foi meu colega de profissão no Centro Paula Souza, tenho certeza que nossas conversas contribuíram muito para esse trabalho e para meu amadurecimento profissional e pessoal.

ao meu tio Francisco de Almeida Filho, pois se não fossem por nossas conversas e seu incentivo teria percorrido um caminho bastante diferente quanto à minha profissão.

ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico(CNPQ) pela bolsa e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro concedido ao projeto,

à UNESP *campus* de Itapeva por ceder toda a infraestrutura necessária para a realização dessa pesquisa.

ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UNESP *campus* de Guaratinguetá pela oportunidade de realizar meu doutorado e a todos os professores que fizeram parte deste trabalho.

ao Professor Titular Luis Rogerio de Oliveira Hein pela ajuda concedida na obtenção das imagens de microscopia eletrônica de varredura e topografia.

à Luiz Alves Ferreira Filho, que tem sido um irmão para mim desde a quinta série.

aos meus amigos de faculdade Luiz Fernando Frezzatti Santiago e Ricardo Rodrigues Rosa por todas as conversas e companheirismo realizados nesses 10 anos de convivência.

a todos funcionários do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Estado de São Paulo *campus* Itapetininga pelo ambiente saudável de trabalho. Em especial aos professores Mario Luiz Nunes da Silva, João Lúcio de Barros, Bruno Fernando Gianelli, Cristhiano da

Costa Herrera, Pedro Roberto Goulart, Wlademir Reginaldo de Oliveira e Giuliano Gozzi pelas conversas e amizade nascida nesses 2 anos de IFSP.

e finalmente agradeço especialmente a Deus por ter me concedido saúde, ânimo e capacidade para a realização deste trabalho.

“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspira a seu favor.”

Goethe

Esse trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

- FAPESP – através do processo nº 2011/00680-6

VARASQUIM, F. M. F. A. **Efeitos da granulometria, do desgaste e do material abrasivo no lixamento plano de madeiras.** 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

O processo de lixamento é indispensável para situações onde os processos anteriores de fabricação não foram capazes de garantir as dimensões finais da peça produzida ou quando a qualidade superficial desejada não foi atingida. Este processo é muito usado em indústrias de painéis e de móveis, no entanto, quase sempre é empregado de forma empírica, sem o conhecimento adequado. No presente trabalho analisou-se a influência da granulometria, do desgaste abrasivo e do material abrasivo no lixamento plano da *Corymbia citriodora* e do *Pinus elliottii*. O objetivo do trabalho foi estudar e compreender a correlação entre os fatores de entrada (granulometria da lixa, desgaste do abrasivo, tipo do abrasivo) sobre as variáveis de saída (potência de lixamento, emissão acústica, vibração, rugosidade e integridade superficial) no processo de lixamento. O sistema desenvolvido e utilizado foi composto por uma lixadeira plana, um sistema de aquisição de dados e um sistema eletromecânico de ensaios com acionamento pneumático. Para a análise da influência da granulometria, do desgaste e do tipo do abrasivo foram utilizadas três granulometrias (80, 100 e 120 *mesh*), três tipos de grão abrasivos (óxido de alumínio, carbeto de silício e óxido de zircônio), três níveis de desgaste do grão abrasivo (sem desgaste, desgaste intermediário, desgaste severo) e duas espécies de madeira sendo realizadas seis repetições para cada configuração de ensaio, totalizando 324 ensaios. Os resultados foram analisados estatisticamente através de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, acompanhado do teste de Tukey, que compara as variações aos pares. O sistema eletromecânico de ensaios de lixamento projetado mostrou-se bastante eficiente na aquisição dos dados. O desgaste do grão abrasivo influenciou significativamente na rugosidade de todas as espécies e grãos abrasivos, para ambas as espécies. As variáveis que o desgaste menos influenciou foram a emissão acústica e a vibração. Os melhores valores de rugosidade média foram obtidos para a lixa de óxido alumínio e as piores para a lixa de carbeto de silício. As imagens de MEV e topografia foram importantes para entender a interação do grão abrasivo, com e sem desgaste, com a superfície da madeira.

Palavras chaves: Rugosidade, carbeto de silício, óxido de alumínio, MEV, óxido de zircônio.

VARASQUIM, F. M. F. A. **Effects of particle size, wear and the abrasive on sanding wood plane.** 2014. 157 p. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The sanding process is indispensable for situations where the manufacturing processes were not sufficient to ensure the final dimensions or when the desired surface quality was not achieved. This process is frequently used in panels and furniture industries, however, is almost always used empirically, without the proper knowledge. In the present study we analyzed the influence of particle size, abrasive wear and the abrasive type on *Corymbia citriodora* and *Pinus elliottii* sanding. The objective was to study and understand the correlation between the input factors (particle size, abrasive wear, abrasive type) on the output variables (power sanding, acoustic emission, vibration, roughness and surface integrity) in sanding process. The system developed and used consists of a flat sander, a data acquisition system and an electromechanical testing system with pneumatic actuation. It was used three particle sizes (80, 100 and 120 mesh), three types of grain abrasives (aluminum oxide, silicon carbide and zirconium oxide), three levels of abrasive wear (no wear, intermediate wear, severe wear) and two species of wood for the analysis, it was made six replications for each test configuration, totaling 324. The results were statistically analyzed using variance analysis (ANOVA) with a significance level of 5%, followed by the Tukey test, which compares the variations in pairs. The electromechanical testing system designed sanding proved to be very efficient in data acquisition. The abrasive wear influenced significantly roughness in both species and all abrasive grains types. The variables that wear influenced less were acoustic emission and vibration. The best values of roughness were obtained for aluminum oxide grains and the worst for silicon carbide grains. The SEM images and topography were important to understand the interaction of the abrasive grain with wood surface.

Keywords: Roughness, Silicon carbide, Aluminum oxide, Zirconium oxide, SEM.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO 15

1.1. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 17

2. OBJETIVOS 18

3. REVISÃO DA LITERATURA 19

3.1. MADEIRA DE REFLORESTAMENTO 19

3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO GÊNERO *EUCALYPTUS SP.* 20

3.2.1. *Corymbia Citriodora* 21

3.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO GÊNERO *PINUS SP.* 21

3.3.1. *Pinus elliottii* 22

3.4. PROCESSAMENTO DA MADEIRA 23

3.5. PROCESSO DE LIXAMENTO 25

3.5.1. Lixamento da madeira 25

3.5.2. Grãos abrasivos 29

3.5.3. Granulometria 33

3.5.4. Resistência ao desgaste abrasivo 35

3.6. AQUISIÇÃO DE DADOS 36

3.7. SENSORES PARA CONTROLES DE VARIÁVEIS 38

3.7.1. Potência de lixamento 38

3.7.2. Vibração 40

3.7.3. Emissão Acústica 40

3.7.4. Microscopia Eletrônica de Varredura 41

3.7.5. Rugosidade 42

3.7.6. Rugosidade Média - R_a 45

4. MATERIAIS E MÉTODOS 47

4.1. MATÉRIA-PRIMA E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 47

4.1.1. Desdobro primário e secundário 47

4.1.2. Acabamento e climatização dos corpos de prova 48
4.1.3. Determinação do teor de umidade 49
4.2. ANÁLISE FÍSICA DA MADEIRA 50
4.2.1. Determinação da densidade aparente 50
4.2.2. Determinação da densidade básica 50
4.3. MONTAGEM DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS 51
4.4. LIXAMENTO DOS CORPOS DE PROVA 55
4.4.1. Banco de ensaios 55
4.5. SENSORES E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS 55
4.6. MATERIAL E ACONDICIONAMENTO DAS LIXAS 60
4.7. CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE LIXAMENTO 60
4.8. METODOLOGIA UTILIZADA NOS ENSAIOS 62
4.9. VARIÁVEIS MENSURADAS NO EXPERIMENTO 63
4.9.1. Potência consumida 63
4.9.2. Emissão Acústica 64
4.9.3. Vibração 65
4.9.4. Rugosímetro 65
4.10. ANÁLISE DE IMAGEM 66
4.10.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 66
4.10.2. Topografia das superfícies 67
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 68
5.1. DENSIDADE BÁSICA E APARENTE 68
5.2. VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA 69
5.2.1. Óxido de Alumínio 69
5.2.2. Carbeto de silício 74
5.2.3. Óxido de Zircônio 79

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÃOS ABRASIVOS VARIANDO A GRANULOMETRIA 83
5.4. INFLUÊNCIA DO DESGASTE DO GRÃO ABRASIVO 86
5.4.1. Óxido de Alumínio 86
5.4.2. Carbeto de silício 95
5.4.3. Óxido de zircônio 104
5.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÃOS ABRASIVOS VARIANDO O DESGASTE ABRASIVO 112
5.6. ANÁLISE DE IMAGENS 114
5.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura 114
5.6.2. Análise de topografia 134
5.7. COMPARAÇÃO ENTRE AS IMAGENS DE MEV E TOPOGRAFIA 146
6. CONCLUSÕES 147
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 149
REFERÊNCIAS 150

1. INTRODUÇÃO

Nesta década de 2010, é quase impossível realizar qualquer projeto sem que se use a palavra sustentabilidade. Com ameaças de “apagões” de recursos indispensáveis para a qualidade de vida, tornou-se indispensável a busca de alternativas para que se diminua o impacto no ambiente sem que o recurso torne-se escasso.

Desde o final do século passado, a indústria madeireira convive com o medo de falta de matéria prima para a confecção de seus produtos e a degradação do meio ambiente. As primeiras medidas foram restringir e/ou proibir o corte de algumas espécies nativas brasileiras, devido ao grande tempo que algumas delas levam para atingir a idade de corte e a sua importância ao meio que pertence. Devido a esses riscos, o plantio de florestas de espécies de rápido crescimento ganhou força no Brasil

A indústria madeireira conviveu, no começo da década, com um possível “apagão” florestal das espécies de reflorestamento, isto é, as indústrias atingiram um nível de produção no qual as florestas plantadas não seriam suficientes para suprir a demanda da produção industrial. Com isso o uso consciente e eficiente da matéria prima se fez necessário.

Em países desenvolvidos o processamento da madeira é muito mais eficiente do que em nossas indústrias, devido à mão-de-obra qualificada e estudos sobre o material, desde técnicas de plantio até a qualidade superficial da peça, diminuindo o custo do produto e o consumo de matéria prima. Já no Brasil as indústrias madeireiras se dividem em três grandes grupos (celulose, painéis e madeira maciça). Dentre estas três, a indústria de madeira maciça é que se encontra mais atrasada nos quesitos qualidade e eficiência.

A indústria de madeira maciça muitas vezes realiza processos de forma empírica, sem que se leve em conta as características da madeira no processo de usinagem, afetando assim a qualidade do produto gerado. Para processar de forma satisfatória o material madeira, é de suma importância o conhecimento das características da espécie a ser usinada. As características físicas, químicas e mecânicas da madeira podem variar de acordo com a espécie, a posição na tora, entre árvores de mesma espécie, local de plantio, teor de umidade, direção das fibras, densidade, dentre muito outras que são importantes e influenciam nas variáveis de controle do processo.

Quando o processamento da madeira não é executado de forma correta e a peça ainda pode ser utilizada, podem ser realizados dois processos distintos para melhorar a qualidade

superficial da madeira gerada, o retrabalho, no qual a peça deve passar novamente na linha de produção e o processo de lixamento, que pode dar as dimensões ideais da peça.

O processo de lixamento da madeira pode ser divido em dois tipos, dependendo da forma como é realizado. O primeiro é um processo de adequação dos limites geométricos da peça, no qual o processo de lixamento remove maiores quantidades de material, a fim de deixar a peça dentro dos padrões mínimos de qualidade. O segundo é o acabamento do material, no qual o lixamento remove pequenas parcelas de material, buscando excelência na qualidade superficial da madeira.

A qualidade superficial da madeira é de grande importância na indústria de madeira maciça, pois uma superfície de alta qualidade diminui a quantidade a ser utilizada de tintas, selantes e vernizes. Porém, o processo de lixamento é um processo de usinagem complexo, no qual se trabalha com grãos abrasivos e estes não possuem uma aresta de corte definida. Além disso, com o passar do tempo, o grão abrasivo vai sofrendo desgaste e se auto fraturando e gerando novas arestas cortantes. Mais uma vez, é de suma importância conhecer as características da madeira que será lixada para evitar problemas como o empastamento da lixa devido a presença de resinas e outros elementos da madeira.

Os grãos abrasivos possuem formatos diferentes, dependendo da sua composição química e com isso variando a capacidade de corte e o acabamento superficial da peça a ser lixada. Além disso, os grãos abrasivos variam de acordo com o tamanho e consequentemente quanto menor o grão abrasivo melhor a qualidade superficial obtida.

A compreensão do processo de lixamento é de grande importância para atingir a qualidade superficial esperada da madeira, a fim de minimizar os impactos das variáveis do processo e com isso corrigindo o impacto das imperfeições da própria madeira no processo.

Apesar de o lixamento estar presente nas principais indústrias do setor madeireiro, como a indústria de painéis e de móveis, o processo é realizado na maioria das vezes de forma empírica. Comparado a outros processos, muito pouco se conhece sobre a influência de suas variáveis na qualidade das peças produzidas e nos esforços de usinagem. Além disso, não há uma metodologia normalizada para ensaios de lixamento, dificultando a comparação entre trabalhos realizados na área.

1.1.JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

As principais motivações para a realização desse trabalho foram a falta de trabalhos existentes na área, principalmente no Brasil, visto a complexidade do tema e a construção de uma bancada de ensaios onde fosse possível analisar o processo de lixamento para avaliar a qualidade do mesmo. A utilização das duas espécies teve como intuito avaliar duas densidades diferentes e ver como a qualidade superficial e processo de lixamento se comportariam perante a variação de densidade do material. O conhecimento do processo de lixamento é de grande importância não só pela falta de trabalhos científicos na área de lixamento, pois o processo é bastante empregado em industrias de móveis no país.

2. OBJETIVOS

Os principais objetivos desse trabalho foram:

- Estudar o comportamento da rugosidade, da potência de lixamento, da emissão acústica e da vibração no lixamento plano de duas espécies de madeira (*Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*) para três diferentes tipos de grão abrasivo (óxido de alumínio, carbeto de silício e óxido de zircônio), em três diferentes granulometrias (80, 100 e 120 *mesh*);
- Estudar a influência do desgaste dos grãos abrasivos no processo de lixamento;

3. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo irá oferecer um embasamento teórico explicando a fundamentação e mostrar a evolução do tema abordado nessa tese.

Para uma melhor compreensão sobre a importância do estudo do lixamento de madeira de reflorestamento (pinus e eucalipto) primeiramente serão abordados o crescimento e a utilização destas espécies. Depois será explanado sobre o processamento da madeira, após isso serão apresentadas as principais características sobre o lixamento e por final será explanado sobre aquisição de sinais.

3.1.MADEIRA DE REFLORESTAMENTO

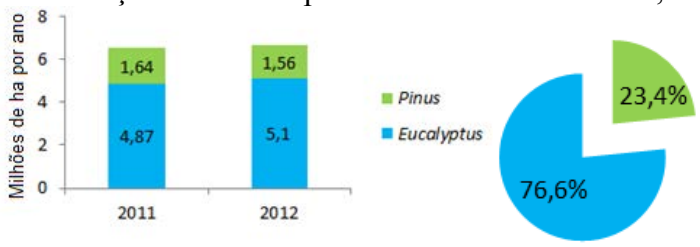
O mercado brasileiro possui uma grande quantidade de indústrias que utilizam madeira como matéria prima, dentre as quais pode-se citar indústrias de papel e celulose, painéis à base de madeira, indústria moveleira, siderurgia com o uso do carvão vegetal e biomassa, entre outras.

Cada vez mais se utiliza madeiras provenientes de reflorestamento, esse aumento ocorreu devido ao crescimento lento das árvores nativas e com isso sua escassez no mercado. Com isso duas espécies que se destacaram no mercado brasileiro foram o Pinus e o Eucalipto.

Segundo a ABRAF (2013), em 2012, o valor bruto da produção obtido pelo setor totalizou R$ 56,3 bilhões, indicador 4,6% superior ao de 2011. Os tributos arrecadados corresponderam a R$ 7,6 bilhões (0,5% da arrecadação nacional). O saldo da balança comercial da indústria nacional de base florestal (US$ 5,5 bilhões), embora 3,8% inferior ao alcançado em 2011 ampliou sua participação no superávit da balança comercial nacional de 19,1% para 28,1%.

Na Figura 1 é mostrada a quantidade de hectares plantados de Pinus e Eucalipto no Brasil e a distribuição em percentagem dessas florestas entre essas duas espécies.

Figura 1- Distribuição da área de plantios florestais no Brasil, 2011 e 2012.



Fonte: ABRAF, 2013 adaptada.

3.2.CARACTERÍSTICAS GERAIS DO GÊNERO *EUCALYPTUS SP*.

Segundo Silva (2002), a grande experiência silvicultural brasileira se limitou à produção de florestas jovens, de ciclo curto e de rápido crescimento. Observou-se um vasto e bem sucedido programa de reflorestamento, com algumas espécies do gênero *Eucalyptus*, visando atender, principalmente, as necessidades de matéria-prima para a produção de polpa celulósica, chapa de fibra, carvão e lenha.

Segundo Cruz (2000), apesar do grande incremento verificado no plantio das árvores de eucalipto, a madeira não interessava à indústria moveleira, pois essa apresentava grandes defeitos. Com o avanço da tecnologia e dos estudos, atualmente o eucalipto tem sido uma boa alternativa para a indústria moveleira, desde que se tome as precauções necessárias.

Segundo Moura (2000) a qualidade de uma madeira está diretamente relacionada às propriedades anatômicas, físicas e químicas. A combinação destas propriedades irá definir sua melhor forma de utilização. Para avaliar sua qualidade, é importante definir o uso, identificar os fatores que afetam essa madeira, quantificá-los, além de avaliar seus efeitos na qualidade do material.

Por ser um gênero de rápido crescimento, a madeira de *Eucalyptus sp.* é de difícil usinagem devido ao aparecimento de trincas e fendas, empenamento, torção por causa das tensões internas de crescimento. Por isso faz-se necessário o conhecimento mais profundo sobre seu processamento para evitar esses tipos de defeitos.

A madeira de *Eucaliptus sp.* pertence ao grupo das folhosas que são árvores mais evoluídas. Burger e Richter (1991) ressaltam que árvores desse grupo têm uma estrutura celular mais complexa que as coníferas, tendo sua estrutura composta por vasos, fibras, parênquima radial e axial. Os autores ainda ressaltam que o tamanho de suas fibras varia entre 0,5 a 2,5 mm.

Cada um dos seus elementos celulares possui uma função diferente. As fibras são responsáveis pela sustentação da árvore enquanto as células de parênquimas são células de armazenamento dos nutrientes da árvore e por último os vasos são responsáveis pelo transporte de seiva e nutrientes pela árvore.

3.2.1. *Corymbia Citriodora*

O *Corymbia citriodora* (ex *Eucalyptus citriodora*) é uma espécie caracterizada por possuir porte médio a grande, com média de 50 m de altura e 1,2 m de DAP (diâmetro na altura do peito), com pouca folhagem e uma ótima forma de tronco. Esta, no Estado de São Paulo, tem boa resistência à escassez de água e é suscetível a geadas. É comum a incidência de bifurcações nestas árvores devido às deficiências nutricionais em solos pobres. Esta folhosa, por sua vez, regenera-se bem através de brotações das cepas (INSTITUTO DE ESTUDOS E PESQUISAS FLORESTAIS, 2012).

Segundo a Agrotropical Insumos Agrícolas Ltda. (2012), a ocorrência desta espécie no Brasil se dá principalmente nas regiões de Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Maranhão, Pernambuco e Paraíba. Esta madeira é ideal para a confecção de móveis, já que, contém boas características de lixamento, furação, aplainamento e acabamento, ou seja, é de fácil trabalhabilidade. Tem ótima durabilidade natural, tratabilidade química e excelente resistência ao apodrecimento. É indicada para serrarias, entretanto, seu desdobro necessita de técnicas apropriadas para o seu melhor aproveitamento e minimização dos efeitos causados pelas tensões de crescimento. É amplamente utilizada na construção civil, em postes, dormentes, mourões, lenha, carvão e na extração de óleos essenciais devido ao seu aroma agradável.

Lemos *et al*. (2012) estudaram a variação das propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* e os resultados mostraram que a densidade básica da espécie em estudo apresentou pouca variação entre as posições cerne/alburno e no sentido longitudinal. A contração volumétrica da madeira do cerne apresentou variações significativas no sentido longitudinal e entre o cerne/alburno.

3.3.CARACTERÍSTICAS GERAIS DO GÊNERO *PINUS SP*.

Segundo Shimizu (2005), no Brasil, os pinus vêm sendo plantados há mais de um século, tendo sido inicialmente introduzidos para fins ornamentais. Somente a partir de 1950 é que foram plantados em escala comercial para produção de madeira. O principal uso deles é como fonte de matéria-prima para as indústrias de madeira serrada e laminada, chapas, resina, celulose e papel.

Considerando as florestas de *Pinus*, as espécies que mais se destacam são o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda*, devido à facilidade de tratos silviculturais, rápido crescimento e reprodução intensa (SHIMIZU, 2005).

De acordo com Ferreira (2003), o *Pinus elliottii* é uma espécie originária dos Estados Unidos, sendo conhecido no Brasil como pinus, pinheiro ou pinheiro-americano. Entre suas principais características tem cerne e alburno indistintos pela cor, cheiro e gosto característicos (devido principalmente à resina), e em termos de trabalhabilidade, é relativamente fácil de desdobrar, aplainar, desenrolar, lixar, tornear, furar, fixar e colar. É uma madeira leve (tendo densidade básica igual a $\rho_b = 0{,}42$ g.cm^{-3}, e com 15% de umidade, igual a $\rho_{(ap,15)} = 0{,}48$ g.cm^{-3}), sendo muito empregada na construção de cordões, guarnições, rodapés, forros e lambris.

O Pinus pertence ao grupo das coníferas e Burger e Richter (1991) destacam que seus principais elementos estruturais são os traqueídes axiais ou fibras, que ocupam 95% do volume da madeira. Essas fibras ou traqueídes são células alongadas e estreitas que possuem um comprimento médio entre 2 e 5 mm.

3.3.1. *Pinus elliottii*

Segundo a Forestry Compendium (2002), o *Pinus elliottii*, conífera natural da América do Norte (EUA), tem sido cultivado em diversos países para a produção de madeira, tendo melhor desenvolvimento no Hemisfério Sul, como no Brasil, Argentina, Chile, África do Sul, Austrália, entre outros. O seu porte varia de 18 a 30 m de altura, com um diâmetro em torno de 0,6 m, com um tronco rígido e ereto. Esta espécie se adapta a diferentes tipos de solos, porém, ela cresce melhor em solos mais profundos, bem arejados, que contenham uma maior umidade durante a estação de crescimento, sendo este, o motivo do seu melhor desempenho em países com climas tropicais, quente e úmido.

Devido à rigidez de sua madeira, o *Pinus elliottii* é muito utilizado em produtos de madeira maciça, mas é necessária a utilização de preservantes com frequência no material. Ele é muito útil na construção civil, molduras, em marcenarias, pisos, carrocerias, caixas, brinquedos, barcos, madeira compensada etc. Usado também como lenha e para a extração da resina, que após a sua destilação, obtém-se o breu e a terebintina, muito utilizados na indústria de papel e tintas, respectivamente (LOUPPE *et al*., 2008).

Serpa *et al.* (2003) estudaram algumas propriedades das madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii* e observaram que a madeira de Pinus foi a que apresentou a menor densidade básica, contração volumétrica, resistência à flexão e à compressão.

3.4.PROCESSAMENTO DA MADEIRA

A madeira é um material que tem seu uso bastante extenso na confecção de móveis, estruturas de madeira, produção de painéis, celulose e papel entre outros. Apesar de seu grande uso, muitas indústrias ainda fazem o processamento da madeira de forma muito empírica sem que haja o controle mais rígido das variáveis que influenciam na qualidade final do seu produto.

Por ser um material de estrutura molecular amorfa e de grande heterogeneidade deve-se tomar cuidado com o processamento de madeiras de espécies diferentes, pois suas características irão variar bastante. Portanto, dependendo da espécie da madeira, as características de usinagem podem ser completamente distintas quando comparadas entre si.

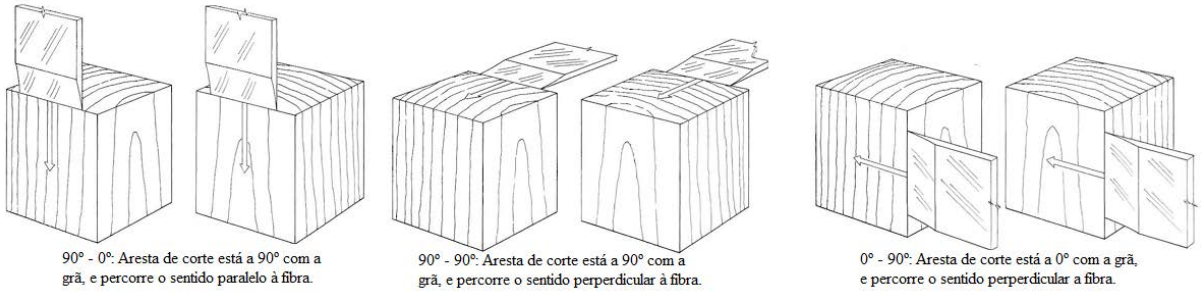
A madeira é um material anisotrópico, isto é, possui diferentes características de acordo com a direção observada, essas diferenças afetam propriedades importantes no processamento, como a contração da madeira. Além disso, é importante ressaltar que a madeira possui um ponto de saturação das fibras (PSF) para acumulo de umidade, que varia mas em média é entre 28 e 30% de umidade. Quando o teor de umidade se encontra acima do PSF não há nenhum efeito em sua superfície para a secagem até o PSF. Porém para se obter um teor de umidade abaixo de PSF a madeira começa a sofrer com contrações em seus planos de corte.

Segundo a Forest Products Laboratory (1999) a madeira tem duas direções distintas de corte, o corte tangencial aos anéis de crescimento e o corte radial. Também deve-se tomar cuidado com a umidade na madeira, pois a mesma é um material dimensionalmente estável quando suas fibras estão saturadas de água, porém quando não há essa saturação, a madeira fica constantemente trocando de umidade com o ambiente até que se encontre novamente em equilíbrio.

Com isso, é de suma importância que se processe peças de madeira que estejam em equilíbrio com a umidade do ar, evitando assim problemas com as dimensões finais, trincas, peças empenadas entre outros.

Kopag e Sali (2003) analisaram a grande importância do controle no processamento da madeira para o seu melhor aproveitamento. Segundo os autores deve-se levar em consideração o teor de umidade, as características físicas e químicas de cada espécie, direção da fibra em relação à ferramenta de corte (Figura 2).

Figura 2 - Sistemas de corte ortogonal da madeira (HOADLEY, 2000 adaptada).



Fonte: Hoadley, 2000 adaptada.

Ainda segundo Kopag e Sali (2003), de acordo com a variação do ângulo das ferramentas de corte e da direção de usinagem varia-se o tipo do cavaco gerado, bem como a qualidade superficial obtida.

Para o processamento da madeira normalmente são utilizados o corte com serra (circular ou fita) e depois um aplainamento para deixar as peças com suas superfícies paralelas entre si. Segundo Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006), a qualidade superficial da madeira é uma das características que mais influencia os processos de usinagem e acabamento, bem como a força da linha de cola de peças de madeira.

Dundar, Akbulut e Korkut (2008) estudaram a relação entre a qualidade superficial das lâminas das madeiras de *Tieghemella heckelii* e *Fagus orientalis* eles variaram a temperatura de secagem, bem como, velocidade de corte e espessura da lâmina, por final concluíram que a espessura da lâmina de madeira, velocidade de corte e ângulo da ferramenta possuem um efeito significativo sobre a rugosidade final.

Hiziroglu, Zhong e Tan (2013) caracterizaram mecanicamente a linha de cola das madeiras de *Pinus strobus*, *Dryobalanops spp*. e *Shorea spp.* em comparação com a qualidade superficial das mesmas lixando-as com as seguintes granulometrias 80, 100 e 240 *mesh*. Os corpos de prova foram climatizados até atingirem 13% de umidade. Os resultados obtidos mostraram que não houve uma influência significativa da rugosidade sobre o cisalhamento. A plataforma de ensaio também se mostrou eficiente.

3.5.PROCESSO DE LIXAMENTO

A usinagem com abrasivos faz parte dos processos de fabricação que utilizam grãos de partículas muito duras na abrasão ou polimento a fim de modificar a forma, a textura e a dimensão da superfície das peças. Processos com abrasivos são principalmente usados para produzir peças de elevada qualidade superficial e com grande precisão (MARINESCU *et al.*, 2004).

Malkoçoğlu (2007) estudou os parâmetros de usinagem a fim de obter a melhor qualidade superficial sem que houvesse a necessidade de lixar a madeira. Os resultados obtidos mostraram que a rugosidade é influenciada positivamente pela diminuição do ângulo de saída da ferramenta e a diminuição da velocidade de alimentação. Porém, ficou claro que os valores obtidos de rugosidade melhoraram em condições usuais de usinagem e para superfícies mais homogêneas faz-se necessário o uso do processo de lixamento.

Em seus estudos, Atkins (2009) fez uma analogia comparando o processo de lixamento com a retificação; essa semelhança é notada devido a deposição do material abrasivo sobre a superfície da lixa. A grande diferença entre esses processos é que durante a retificação os grãos fraturados e gastos são desprendidos do rebolo dando espaço para novos grãos enquanto na lixa existe apenas uma camada disposta, sendo assim, se o grão se desprender sobra apenas a camada de adesivo de ancoragem sobre o costado da lixa.

Bianchi *et al.* (1999) estudaram o processo de retificação e definem que a usinagem por abrasão é o processo responsável por melhorar o acabamento de peças, fundamentado na abrasão de grãos que são fixados por um ligante.

3.5.1. Lixamento da madeira

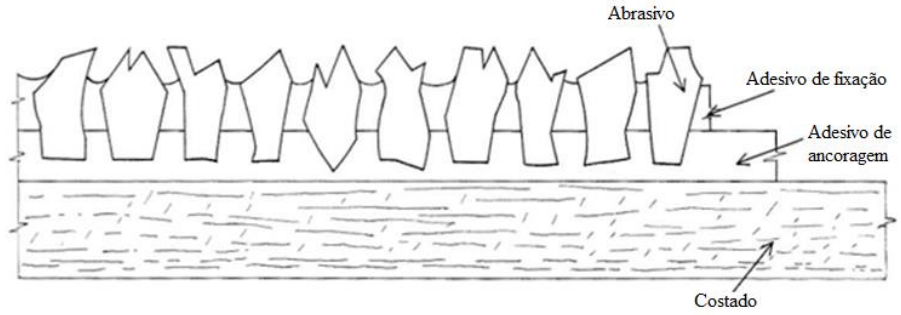
O processo de lixamento (usinagem com grãos abrasivos) é um dos processos de maior custo para a indústria madeireira. Este processo é difícil de ser caracterizado e analisado, por causa da natureza aleatória da distribuição dos grãos na lixa. No caso de lixamento de materiais heterogêneos como a madeira, a complexidade do processo aumenta e muitas variações devem ser consideradas (SALONI *et al.*, 2010).

O lixamento é um processo no qual se busca a homogeneização de uma superfície através do contato dos grãos abrasivos da lixa com a peça que será trabalhada. Esse processo é utilizado muitas vezes para a preparação da superfície da madeira.

Em peças que normalmente são pintadas e/ou envernizadas, e também quando se necessita de ajustes dimensionais, são utilizados processos como o lixamento sobre a superfície da madeira. Gonçalves *et al.* (2010) ressaltam que o processo de lixamento é bastante utilizado quando a superfície da madeira necessita maior qualidade superficial.

A lixa é a ferramenta responsável pela remoção de material. Ela é composta basicamente por um costado, duas camadas de adesivo e uma camada grãos abrasivos. Alguns aditivos podem ser colocados a fim de melhorar seu desempenho, diminuindo o empastamento e melhorando a dissipação de calor. Na Figura 3 é mostrada a composição de elementos existentes em uma lixa.

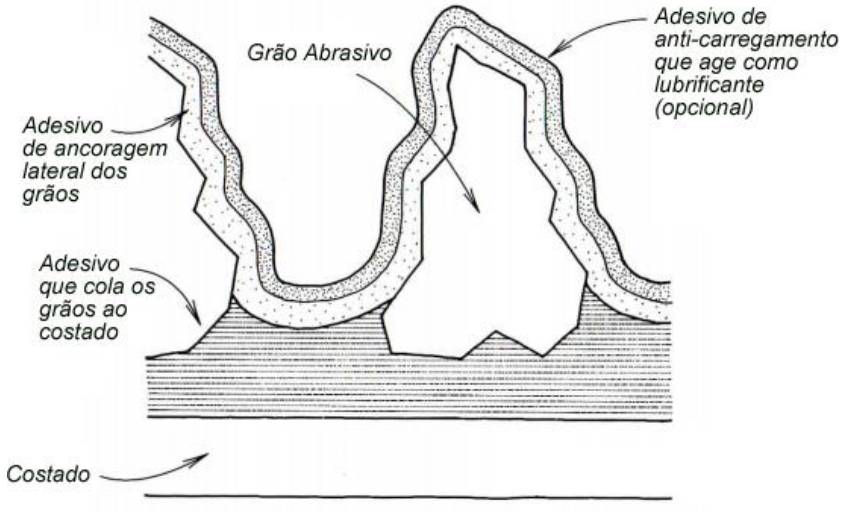
Figura 3 – Esquema de uma lixa.



Fonte: Hoadley, 2000 adaptada.

A fixação dos grãos abrasivos sobre o costado da lixa é feita através de duas camadas de adesivos, uma responsável pela ancoragem dos grãos ao costado da lixa e outra para fazer o recobrimento do grão (Figura 4).

Figura 4 – Fixação dos grãos abrasivos no costado da lixa.



Fonte: Nagyszalanczy, 1997 adaptada.

No mesmo estudo, Gonçalves *et al.* (2010) também citam que o mecanismo de lixamento pode ser dividido em três etapas: atrito do grão, deformação e corte (Figura 5).

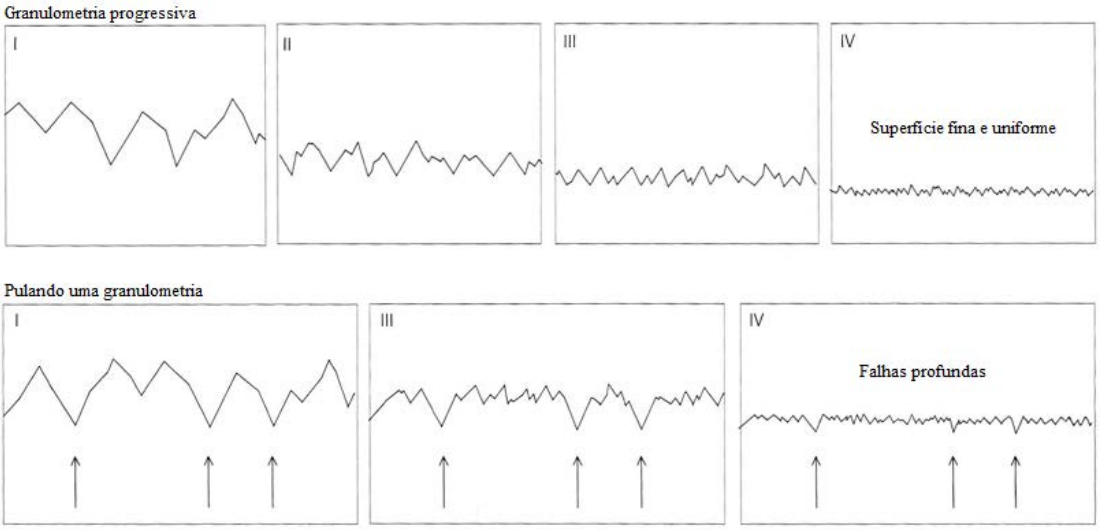
Diferentemente de outros processos, no lixamento não há aresta de corte definida, pois, o grão abrasivo vai se deformando e fraturando à medida que o lixamento ocorre.

Figura 5 - Interação do grão abrasivo com a peça.



Para melhorar a qualidade superficial, Hoadley (2000) cita que é melhor utilizar um conjunto de lixas, diminuindo o tamanho do grão abrasivo progressivamente, de acordo com a qualidade final. Na Figura 6 é apresentado o motivo da necessidade da diminuição do tamanho do grão abrasivo.

Figura 6 - Processo de lixamento da madeira com e sem granulometria progressiva.



Fonte: Hoadley, 2000 adaptada.

Quando não se utiliza a granulometria progressiva no lixamento a superfície acaba ficando com algumas falhas mais profundas e isso se deve a limitação do tamanho do grão abrasivo, junto com a heterogeneidade do material que possui falhas na sua estrutura. O

processo de lixamento risca a superfície da madeira e esses riscos tem a profundidade definida pelo tamanho do grão abrasivo. Caso haja um defeito maior que o grão abrasivo o mesmo não conseguirá remover essa imperfeição da superfície.

Kilica, Hiziroglu e Burdurlu (2006) estudaram o efeito dos processos de usinagem sobre a qualidade superficial das espécies *Populus tremula* e *Fagus orientalis*. Todos os corpos de prova tiveram sua umidade uniformizada em 10%. Para isso foram aplainados e depois lixados com lixas de 60 e 80 *mesh* respectivamente. O lixamento foi feito tanto paralelamente como perpendicularmente às fibras. Os resultados obtidos foram que a rugosidade diminui de acordo com o processo realizado e os menores valores obtidos foram depois serem lixados com a última granulometria.

Sulaiman *et al.* (2009) estudaram o efeito do lixamento na madeira de seringueira. Eles utilizaram a técnica de adesão superficial junto com um rugosímetro apalpador para a medição da qualidade superficial. As amostras foram secas em laboratório até atingirem teor de umidade entre 8 e 10%. Os resultados obtidos foram que a rugosidade melhorou para granulometrias maiores, porém, a adesão superficial foi melhor com menores granulometrias, comprovando que superfícies que possuem baixa qualidade superficial aderem melhor os líquidos. Os valores de rugosidade foram maiores quando medidos ao longo da fibra do que perpendicular à fibra.

Um bom lixamento assegura uma melhor penetração e uniformidade do produto aplicado no material. No entanto, um problema intrínseco ao lixamento da madeira é o fato de existir heterogeneidade nesta matéria-prima (espécie, diferentes densidades, dureza, orientação das fibras, tamanhos de poros, divergência entre madeira jovem e velha), fazendo com que seja necessária a troca de lixas para diferentes tipos de madeira. Muitas indústrias de móveis não atentam a esses fatores e acabam utilizando o mesmo procedimento paras todas as espécies de madeira usadas (HENDARTO *et al.*, 2013).

Tiburcio (2009) em seu trabalho de doutorado realizou a medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e 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 média. Neste experimento foram utilizadas diferentes velocidades de avanço do torno, espécies de eucalipto e conjuntos de granulometria de lixas de óxido de alumínio. O autor concluiu que para os três conjuntos de lixas empregadas, o conjunto de lixas de 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.

Santoni e Pizzo (2011) estudaram a molhabilidade de seis espécies de madeira (*Picea abies* Karst., *Pinus pinea* L., *Quercus* sp.p., *Castanea sativa* Mill., *Fagus sylvatica* L. e *Populus* sp.p.) variando o método de processamento: serramento, aplainamento e lixamento. A avaliação foi feita depois da usinagem e depois de 24 horas expostas ao ar. Eles concluíram que as superfícies de todas as espécies que foram lixadas apresentaram as melhores características comparadas com os outros processos e isso só é possível devido a reativação da superfície através da remoção das fibras da madeira.

Wolkenhauer *et al.* (2009) fizeram uma comparação entre o processo de lixamento e o tratamento com plasma através da qualidade superfície da madeira. Para a avaliação utilizaram a energia de adesão superficial. Essa energia de adesão superficial é importante na aplicação de tintas e vernizes. Com seus ensaios eles concluíram que tanto o plasma como o lixamento melhoram a superfície da madeira aumentando sua energia de adesão superficial, porém a melhor condição na qual se chegou foi utilizando os dois processamentos, primeiro o lixamento e depois o tratamento com plasma. Se fosse para escolher apenas um tratamento o plasma obteve melhores resultados que o lixamento.

Dentre todas as variáveis que envolvem o lixamento e que podem impactar na qualidade final do processo, deve-se destacar a escolha do material abrasivo e a sua granulometria.

3.5.2. Grãos abrasivos

Segundo Marinescu *et al.* (2004), os materiais utilizados como abrasivos podem ser tanto de origem natural como materiais sintéticos e são considerados como ferramentas de corte sem aresta de corte definida com grande dureza, arestas afiadas e boa capacidade de corte.

Marinescu *et al.* (2007) relatam que os grãos abrasivos podem ser divididos em 2 categorias:

- Abrasivos convencionais baseados em carbeto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3);
- Superabrasivos baseados em CBN (Nitreto de boro cúbico) e diamante.

Dentre os grãos abrasivos mais utilizados para o lixamento estão o óxido de alumínio e o carbeto de silício e a adição de zircônia aos grãos de óxido de alumínio têm sido bastante utilizados atualmente. Suas principais características são friabilidade, dureza e formato do grão.

O óxido de alumínio é o grão mais popular no lixamento de madeiras. Este abrasivo possui um bom equilíbrio entre dureza, afiação e resistência. Seu formato de cunha permite que o grão penetre em materiais densos e se desgaste pouco e sua aplicação vai desde a remoção de defeitos profundos até acabamentos superficiais mais finos. Esse grão é obtido através do processamento da alumina, a qual é indicada para a maioria dos processos abrasivos. Segundo Marinescu *et al.* (2004) o óxido de alumínio é mais resistente que o carbeto de silício, mas nem sempre o grão mais resistente é o mais abrasivo.

O mesmo autor define friabilidade como a tendência do grão se fraturar em pequenos fragmentos sob os esforços de pressão e está relacionada com formato, integridade e pureza do cristal. Já dureza é a resistência ao risco e pode ser avaliada de diversas maneiras. Porém para abrasivos as escalas mais utilizadas para sua avaliação são Rockwell e Knoop, que são testes voltados a dureza de penetração. No Quadro 1 são apresentados alguns valores de dureza e uso de alguns abrasivos.

Quadro 1 - Propriedades mecânicas dos abrasivos à base de alumina e SiC.

Abrasivos	**Dureza Knoop**	**Dureza Relativa**	**Aplicação**
SiC verde	2840	1.60	Cerâmicas de precisão
SiC preto	2680	1.75	Ferro fundido, cerâmicas e materiais dúcteis não ferrosos
Al_2O_3 Vermelho	2260	1.55	Aço rápido e liga metálica de alta densidade
Al_2O_3 Branco	2120	1.75	Materiais de precisão de ferro
Al_2O_3 Marrom	2040	2.80	Qualquer material
Al_2O_3 10%ZrO	1960	9.15	Retificação pesada
Al_2O_3 40%ZrO	1460	12.65	Rebarbação pesada
Al_2O_3 sinterizado	1370	15.40	Materiais fundidos e lingotes

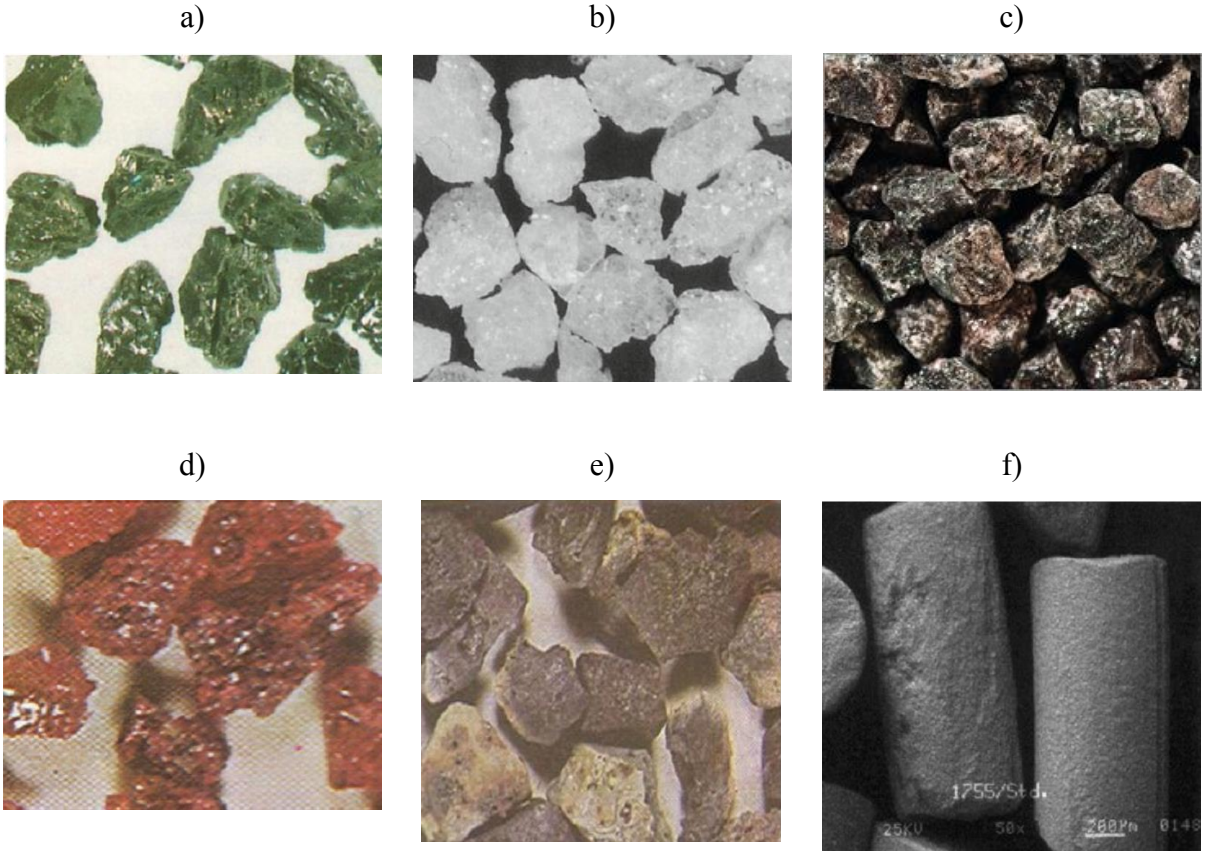
Fonte: MARINESCU *et al.*, 2004 adaptada.

A dureza relativa é a propriedade que se relaciona diretamente com a friabilidade dos grãos abrasivos, isto é, quanto maior o seu valor maior a capacidade do grão se fraturar. O maior valor obtido é o da Al_2O_3 sinterizada , pois o processo de sinterização produz um grão muito puro com alta capacidade de se fraturar, formando micro arestas.

A friabilidade também leva em consideração o formato do grão. Segundo Marinescu *et al.* (2004) não se deve buscar uma grande resistência à friabilidade, pois um grão que demora a se desgastar pode muitas vezes danificar a superfície e aumentar a vibração sobre o processo abrasivo, enquanto que um grão que se desgaste muito rapidamente pode tornar o processo inviável. A friabilidade está ligada ao tamanho do grão abrasivo, sendo que quanto maior a granulometria do material maior a capacidade desse grão se auto fraturar. Na Figura 7 são apresentados os formatos típicos dos grãos abrasivos (JACKSON E DAVIM, 2011).

Segundo Marinescu *et al.* (2004) o carbeto de silício verde tem uma pureza entre 97% e 99% e é utilizado para trabalhos pesados onde o material seja friável e tenha baixa resistência à tração, como ferro, alumínio, bronze e vidro. Já o carbeto de silício preto tem uma dureza maior devido à presença de impurezas na sua estrutura tornando-o um grão significativamente mais friável do que os grãos que tem como base a alumina em sua estrutura. Acima de 760 ºC o carbeto de silício torna-se muito reativo com carbono, ferro e níquel limitando seu uso em processos pesados e materiais não ferrosos. O carbeto de silício também reage com óxido de boro e silicato de sódio, ligantes vitrificados comuns.

Figura 7 - Tipos de grãos abrasivos. a) SiC verde. b) Alumina branca; c) Alumina marrom; d) Alumina vermelha; e) Alumina 25% de zircônio; f) Alumina sinterizada.



Fonte: MARINESCU *et al.*, 2004 adaptada.

Com o desenvolvimento do processo de sinterização, os grãos de óxido de alumínio ganharam adição de materiais para melhorarem sua performance. Os grãos vermelhos e marrons de óxido de alumínio são usados em ferramentas abrasivas vitrificadas ou ligadas por resina com ou sem revestimento e indicados para operações quando o desgaste abrasivo é baixo. Também existem grãos com adição de cromo que os tornam mais resistentes, duros, com tamanho médio e arestas longas e afiadas. Pode-se adicionar titânio melhorando a capacidade de corte e a ductilidade do óxido de alumínio comum (MARINESCU *et al.* 2004)

O carbeto de silício foi o primeiro abrasivo sintetizado no início do século passado. Possui duas colorações para aplicação em processos abrasivos, verde e preto. O carbeto verde é o produto mais puro e é produzido da mistura virgem de areia e coque e o carbeto preto é oriundo de processos de reciclagem incluindo carbetos amorfos de processos anteriores; sua coloração escura vem das impurezas do ferro.

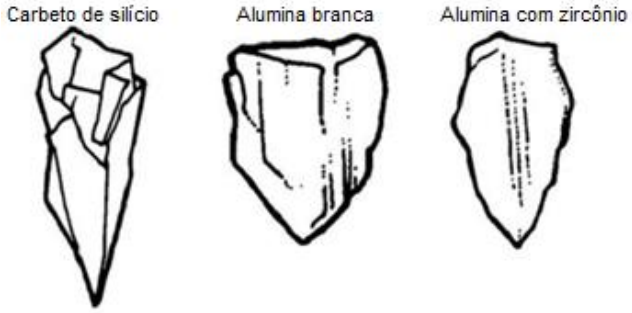
Também há os grãos de óxido de alumíno zirconados, os quais tem como base a alumina com a adição de zircônio em sua estrutura. O zircônio é um metal refratário, mais resistente do que a alumina e com ponto de fusão elevado, necessitando de um controle mais apurado na sua produção, o que pode inviabilizar seu processo. Segundo Marinescu *et al.* (2007) os grãos abrasivos zirconados passam por uma solificicação rápida a fim de gerar uma estrutura resistente com grãos finos. Os abrasivos resultantes desse processo possuem uma estrutura fina, resistente, com boa ductilidade e apresentam boa durabilidade com processos de remoção de material média e pesada.

O formato do grão é de grande importância porque ele está diretamente relacionado com a friabilidade do material abrasivo. Segundo Jackson e Davim (2011) o formato dos grãos abrasivos tem um grande impacto na força gerada sobre os mesmos, no desempenho e nas características finais obtidas pelo processo realizado.

Grãos de carbeto de silício (SiC) são mais agressivos e com maior incidência de superfícies planas, os grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) possuem o formato arredondados e os grãos de óxido de alumínio com zircônio (Al_2O_3 com ZrO) possuem uma estrutura mais refinada e um abrasivo mais duro e friável (Figura 8).

Outra importante variável a ser controlada é a granulometria, isto é, o tamanho do grão abrasivo a ser utilizado no processo.

Figura 8 - Formatos dos grãos abrasivos.



Fonte: MARINESCU *et al.*, 2007 adaptada.

3.5.3. Granulometria

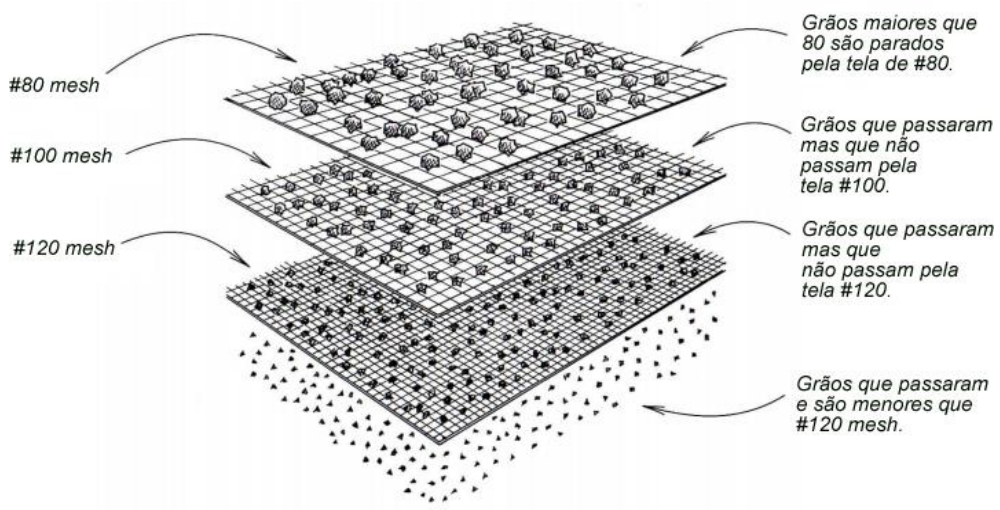
No lixamento, as lixas deixam cavidades nos materiais proporcionais ao tamanho do grão usado. Uma vez que estas cavidades sejam pequenas o suficiente para não serem vistas a olho nu, o processo pode ser finalizado

No lixamento, as lixas possuem diversos tamanhos de grãos abrasivos, isto é diversas granulometrias. Quanto menor a granulometria maior o grão abrasivo e menor a qualidade superficial atingida. Para um processo que preza pela qualidade superficial, o tamanho do grão abrasivo ao longo da lixa deve ser o mais uniforme possível.

A classificação mais usual que padroniza os tamanhos dos grãos é a da norma ANSI Standard B 74.12, que especifica 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 (Figura 9). Quanto maior o número, menor serão os grãos e quanto menor o número, maior serão os grãos (SANTIAGO, 2011).

Ainda segundo Santiago (2011) deve-se ficar atento para a sequência de uso de cada número de lixa. A granulometria seguinte não pode exceder mais que 50% do grão usado anteriormente. Se para um dado 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.

Figura 9 – Sistema de gradeação dos grãos abrasivos.



Fonte: NAGYSZALANCZY, 1997 adaptada.

No Quadro 2 é apresentada uma classificação das granulometrias das lixas junto com a indicação de uso.

Quadro 2 - Aplicações dos abrasivos em função da granulometria.

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

Fonte: HAWKS, 1995.

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 específica da lixa ($N.cm^{-2}$), remoção de material por tempo ($g.cm^{-3}$ $.min^{-1}$) e a velocidade de alimentação ($mm.min^{-1}$). Os autores propuseram que as variáveis de resistência

específica da lixa, remoção de material e velocidade de alimentação são uma função da granulometria da lixa, pressão específica, ângulo de lixamento em relação às fibras, densidade e propriedades mecânicas da madeira. Com relação à remoção específica de material notou-se uma forte 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 granulometrias mais finas. Já para a inclinação das fibras observou-se que conforme se aumenta o ângulo de inclinação das fibras ocorre um aumento na remoção de material.

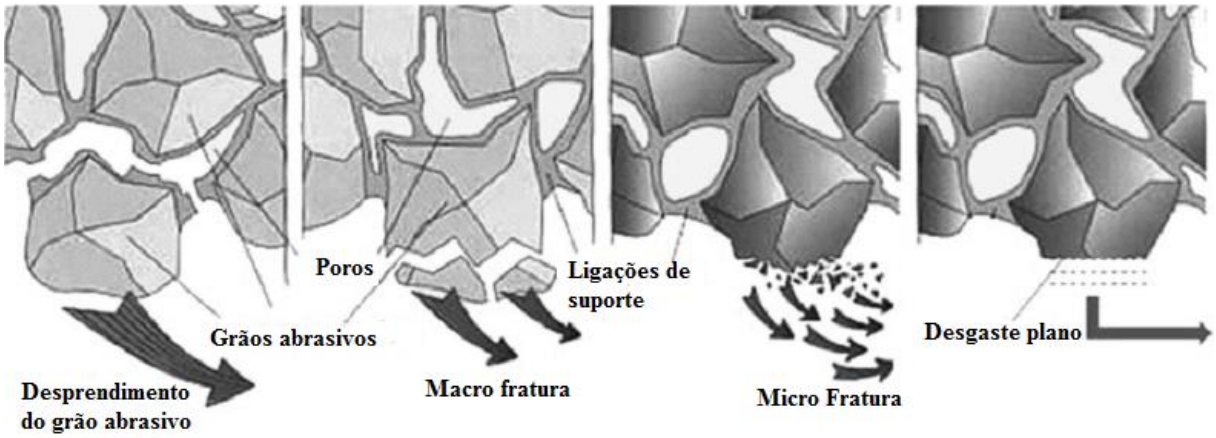
3.5.4. Resistência ao desgaste abrasivo

Todo grão abrasivo se desgasta de acordo com o tempo e o material o qual ele está usinando. A madeira é um material de dureza muito variável, a qual está relacionada diretamente com a densidade que pode variar de 0,14 $g.cm^{-3}$ até 1,30 $g.cm^{-3}$. Para um melhor uso do processo de lixamento é importante saber o comportamento de desgaste do grão abrasivo devido a essa heterogeneidade do material.

Jackson e Davim (2011) explicam que a dureza fornece uma tendência para o grão se fraturar durante o processo de usinagem por abrasão devido ao atrito. A resistência à fratura fornece um valor devido à propriedade do grão se auto fraturar, em escalas macro e micro, durante o processo de usinagem por abrasão. Essa propriedade está diretamente ligada ao tamanho, morfologia, impurezas e forma do grão abrasivo, bem como as propriedades ligadas ao material que será usinado.

Nos processos de usinagem por abrasão onde a ferramenta de corte possui mais de uma camada de grãos abrasivos, há dois tipos de desgaste que o grão pode sofrer, a macro fratura e a micro fratura. Para que o processo de usinagem por abrasão aconteça normalmente, o grão deve se auto fraturar para gerar novas arestas em escala micro. Esse processo é chamado de micro fratura e o restante do grão deve permanecer afiado e com a capacidade de corte. Em processos nos quais houver mais de uma camada de abrasivos e a força do processo não for suficiente para fraturar o grão, este pode acabar se desprendendo da matriz ligante. Quando a ligação entre o grão abrasivo é forte e ainda há forças de usinagem sobre o grão abrasivo, e este é grande, há a macro fratura que é a fratura de grandes porções do abrasivo (Figura 10).

Figura 10 - Auto fratura dos grãos abrasivos.



Fonte: JACKSON E DAVIM, 2011 adaptada.

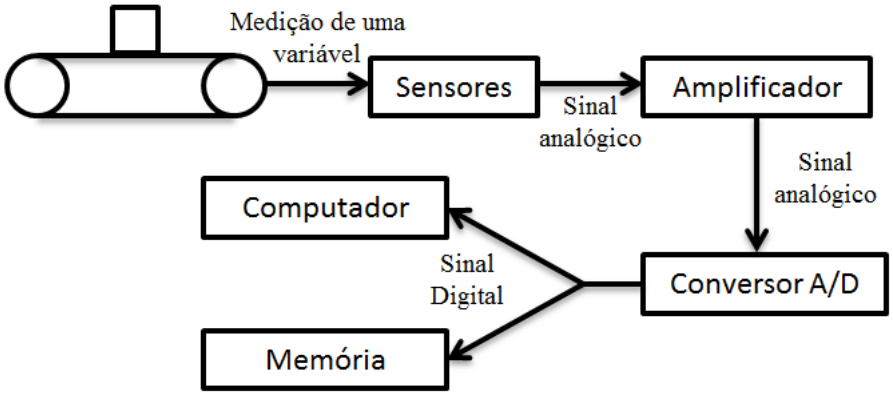
Quando o grão abrasivo é menos resistente que o seu ligante e há o aumento do atrito devido ao desgaste mecânico, térmico ou químico, pode acontecer da superfície do grão abrasivo tornar-se quebradiça fazendo com que o grão se desgaste deixando a sua superfície plana, aumentando consequentemente as forças e as temperaturas do processo.

O processo de lixamento tem suas particularidades quando comparado aos processos de usinagem por abrasão. A mais importante é que a lixa só possui uma camada de grãos abrasivos e estes possuem duas camadas de adesivo para dificultar a remoção deles do costado da lixa. Devido a isso os fenômenos de desgaste que podem ocorrer, sem que comprometam muito a qualidade da ferramenta, são macro e micro fratura e o desgaste plano. Quando se fala de lixamento de madeiras o desgaste abrasivo é pequeno devido à dureza e densidade do material, fazendo com que o grão ao invés de se desgastar perca o corte sem que se frature ficando com o perfil arredondado.

3.6.AQUISIÇÃO DE DADOS

Segundo Parker e Mackay (2003) a aquisição de dados é um processo físico que acontece no mundo real e é transformado em sinais elétricos que são medidos e convertidos em formato digital para seu processamento, análise e armazenamento por um computador. Na Figura 11 é apresentada uma maneira simplificada do princípio básico da aquisição de dados.

Figura 11 - Modelo de instrumentação com amplificador, conversor A/D e um computador.



Fonte: WEBSTER, 2000 adaptada.

O elemento chave de um modelo de análise de dados é o sensor, que tem a função de converter um estímulo gerado pelo processo a ser mensurado em um sinal elétrico de saída. Sinais podem ser manipulados através de um sistema de aquisição de dados, fazendo o uso de um dispositivo elétrico ou até mesmo um circuito elétrico. Os valores do sinal podem ser transmitidos para um dispositivo de saída ou até mesmo armazenados através da medição da tensão nesses sensores. Em sistemas de medidas em variáveis mecânicas, força e potência são usualmente medidas (WEBSTER, 2000).

No Quadro 3 são apresentadas algumas variáveis medidas através de sensores e alguns tipos de resposta que o sensor pode emitir.

Quadro 3 - Variáveis de entrada e de saídas de sensores.

Variáveis físicas	Variáveis de saída dos sinais
Força	Voltagem
Comprimento	Corrente
Aceleração	Força
Velocidade	Frequência
Pressão	
Resistência	

Fonte: WEBSTER, 2000 adaptada.

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.

Os sistemas de aquisição de dados têm evoluído ao longo do tempo a partir de gravadores electromecânicos contendo tipicamente de um a quatro canais para todos os sistemas electrônicos capazes de medir centenas de variáveis simultaneamente. (MEASUREMENT COMPUTING CORPORATION, 2012).

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.; 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).

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, e 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).

3.7.SENSORES PARA CONTROLES DE VARIÁVEIS

3.7.1. Potência de lixamento

O nível de remoção de material de uma determinada peça pode ser diretamente associado ao consumo de potência do equipamento (GONÇALVES *et al.*, 2010).

Para Marinescu *et al.* (2007) a medição do consumo de potência em processos abrasivos é considerado simples, mas a medição dessa variável apenas é limitada para a quantificação dos processos. A quantidade de energia usada para o processo de remoção de material é sempre apenas uma fração do total do consumo de energia. No entanto, o monitoramento de energia é amplamente utilizado em aplicações industriais, definindo limites específicos para evitar qualquer sobrecarga da ferramenta e da máquina. Para processos abrasivos a potência

consumida é um método bastante utilizado devido ser de fácil adequação ao processo, baixo custo e nenhuma influência no conjunto ferramenta/máquina.

Varasquim *et al.* (2012) mensuraram a potência de lixamento através da instalação de um transdutor de potência que captava a corrente de acordo com o aumento do esforço do motor, através de um transdutor de corrente durante o processo de lixamento.

Varanda (2010) realizou um trabalho com uma lixadeira tubular, onde a potência foi analisada, com madeira de *Eucalyptus grandis*, variando as velocidades de lixamento (19,5 - 22,7 – 26 - 28,1 m/s), e a granulometria do conjunto das lixas (P80-P100, P80-P120, P100-P120). As duas maiores velocidades de lixamento (26 e 28,1 m/s) consumiram maior potência de corte para os três conjuntos de lixas. A velocidade de 22,7 m/s consumiu menor potência de corte em todos os conjuntos de lixas usadas. O autor ainda cita que há diversas formas de mensurar a potência de corte de um equipamento. Na usinagem com metais é comum a instrumentação dos processos de usinagem, enquanto que nos processos de usinagem da madeira, é mais recente o emprego da instrumentação.

Fotin *et al.* (2008) investigou 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. 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 da profundidade de corte respectivamente.

Saloni *et al.* (2005) fizeram um estudo que mostrou o aumento da potência consumida com o aumento da velocidade de corte e de avanço, usando-se uma lixadeira de cinta e lixas de óxido de alumínio e carbeto de silício, e mostraram também que pressões maiores geram valores maiores de potência. Samolej e Barcik (2006) estudaram a variação da potência com a granulometria da lixa obtendo como resultado um aumento da potência consumida conforme o aumento da granulometria, e isso varia para os cortes perpendicular e paralelo às fibras. Javorek *et al.* (2006) mostraram que a espécie da madeira tem pouca influência no consumo de potência, mas que a pressão e a direção de corte relativa às fibras, têm importância fundamental na potência de corte.

Segundo Marinescu *et al.* (2007) o monitoramento da potência consumida no motor é uma técnica adequada para evitar o dano superfícial durante processos abrasivos. Essa variável tem sido muito utilizada quando se fala no monitoramento de superabrasivos devido ao desgaste lento do material.

3.7.2. Vibração

Para a captação de vibrações são utilizados sensores aos quais se dá o nome de transdutores de vibração mecânica. Existem vários tipos de sensores, sendo o acelerômetro o mais utilizado devido à sua enorme versatilidade, enquanto outros sensores se destinam a aplicações muito específicas (SEQUEIRA, 2013)

A vibração é um parâmetro de usinagem que pode estar relacionado ao desgaste de ferramentas de corte e falhas de componentes de máquinas devido à variação de forças dinâmicas. O monitoramento desse parâmetro é feito sem interromper o funcionamento da máquina.

Sensores de vibração são conhecidos por acelerômetros piezoelétricos. Baseiam-se no efeito piezoelétrico dos cristais de quartzo para gerarem um sinal elétrico proporcional à aceleração que lhe é aplicada. Em um acelerômetro, a tensão nos cristais ocorre como o resultado da imposição de uma força de uma massa sísmica sobre o cristal. Dentro da faixa de frequência especificada, essa estrutura obedece à segunda Lei de Newton. Desta forma, a quantidade total da carga acumulada é proporcional à força aplicada, que por sua vez, é proporcional à aceleração (MOREIRA, 2007).

Para Alves *et al.* (2009) todos os componentes possuem diferentes e particulares frequências de vibração, que podem ser isoladas e identificadas. A amplitude de cada componente de vibração distinto deverá permanecer constante ao longo do tempo, caso não ocorram alterações na dinâmica operacional da máquina ou mudança na integridade dos componentes. Através da análise de vibrações pode-se detectar desgaste de ferramentas, queima em peças, condição de lubrificação, entre outros.

3.7.3. Emissão Acústica

Kim *et al.* (2001) citam que dentre as formas de sinais utilizados, a emissão acústica se destaca dentre outras formas por apresentar uma particularidade: sua faixa de frequência está bem além de vibrações mecânicas e ruídos elétricos, o que permite que estas interferências sejam facilmente filtradas do processo.

Reddy e Reddy (2010) definem emissão acústica como uma classe de fenômenos onde ondas elásticas são geradas pela liberação rápida de energia provinda das fontes no interior do material. Em outras palavras a emissão acústica é referente às ondas de tensão gerada pelo

processamento do material. Esse tipo de medição é feito principalmente para usinagem de metais. O sinal de emissão acústica foi captado por um elemento piezoelétrico altamente sensível com a ajuda de amplificadores.

Webster *et al.* (1996), citam que uma das melhores formas de se monitorar o sinal de emissão acústica é pelo seu valor RMS (valor quadrático médio), o qual é um valor retificado do sinal de EA (emissão acústica) em intervalos de tempo determinados.

Os sinais de emissão acústica podem ser classificados em dois tipos, sinais contínuos e sinais de sequência. Sinais contínuos são associados com o movimento de deslocamento através da direção do cristal e o atrito entre as superfícies que estão em contato. Sinais de sequência são pulsos de curta duração gerados por liberações discretas de energia de tensão de alta frequência assim como durante o começo, o crescimento e a propagação de micro rachaduras. A aquisição de dados pode ser feita tanto em função do tempo como em função da intensidade. Sinais adquiridos em função do tempo são amostrados com uma frequência definida, enquanto que em função da intensidade a aquisição dos dados é feita somente quando o valor de início é superado (WARREN E GUO, 2007).

Kim *et al.* (2001) também ressaltam que a desvantagem do sinal de emissão acústica refere-se à sua variação de sensibilidade, a qual varia de acordo com o posicionamento do sensor. Assim, para que se obtenha boa sensibilidade e menores interferências, o sensor deve ser posicionado o mais próximo possível da zona de usinagem.

3.7.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

Segundo Maliska (2004), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica muito versátil e usada rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos. Apesar da complexidade dos mecanismos para a obtenção da imagem, o resultado é uma imagem de fácil interpretação.

A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica. A observação e análise de fratura teve um grande avanço com o uso do microscópio eletrônico de varredura (MALISKA, 2004).

Ainda segundo Maliska (2004), a versatilidade da microscopia eletrônica de varredura e da microanálise se encontra na possibilidade de se poder captar e medir as diversas radiações provenientes das interações elétron-amostra. Estas interações podem revelar informações da

natureza da amostra incluindo composição, topografia, potencial eletrostático, campo magnético local e outras propriedades da amostra.

A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de dois a cinco nanômetros (nm) são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que um nm (NAGATANI *et al.*, 1987).

Karinkanta, Illikainen e Niinimäki (2011) estudaram o efeito da anisotropia da madeira de *Picea abies* lixando-a em cinco direções diferentes com a mesma pressão de lixamento e mesma granulometria. Os corpos de prova utilizados eram cúbicos com aresta de 34 mm e teor de umidade de 6%. A pressão média de lixamento utilizada foi de 30,5 KPa e os métodos de avaliação da superfície foram através de MEV de emissão por área, onde a madeira precisou ser recoberta com uma fina camada de prata e outra de ouro para que houvesse a condutividade dos elétrons, para análise visual e também microscopia confocal de varredura a laser para a mensuração da rugosidade. Como resultado eles perceberam que o tipo de cavaco gerado e a resistência ao lixamento variaram de acordo com a direção lixada (longitudinal, transversal e radial).

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação (SERVIDONI, 2012).

3.7.5. Rugosidade

Magoss (2008) define rugosidade como a caracterização de irregularidades em uma superfície usinada. Essas irregularidades podem ser determinadas pela medição da altura, largura e forma dos picos e vales produzidos nas operações de usinagem da madeira ou pela anatomia da mesma. A qualidade superficial é uma complexa definição e é caracterizada quantitativamente nos dias de hoje por diferentes parâmetros como a rugosidade média (Ra),

rugosidade de profundidade média (Rz) e rugosidade máxima (Rmax). Essas variáveis são padronizadas pelas Normas ISO 4287 e 13565-2.

A qualidade superficial da madeira é influenciada por diversos fatores como direção da fibra, densidade da espécie, madeira juvenil e tardia, anéis de crescimento dentre outros. Todos esses fatores influenciam ativamente nos processos de usinagem alterando a qualidade obtida. A madeira é um material amorfo, isto é, não possui estrutura cristalina e homogênea devido a distribuição de seus vasos anatômicos que podem variar entre espécies ou até mesmo na mesma árvore. Esses fatores dificultam a padronização dos métodos de medição de rugosidade em madeiras.

Dundar, Akbulut e Korkut (2008) estudaram a relação entre a qualidade superficial das lâminas das madeiras de *Tieghemella heckelii* e *Fagus orientalis* eles variaram a temperatura de secagem, bem como, velocidade de corte e espessura da lâmina, por final concluíram que a espessura da lâmina de madeira, velocidade de corte e ângulo da ferramenta possuem um efeito significativo sobre a rugosidade final.

Prasad e Sarcar (2008) realizaram um trabalho onde relacionaram o parâmetro rugosidade média (Ra) com o desgaste da ferramenta no processo de torneamento, usando um sistema de medição com rugosímetro, e também um sistema de medição indireta com câmeras, e chegaram à conclusão que a rugosidade está diretamente ligada às condições da ferramenta de corte.

Para melhorar a qualidade superficial no final do processo pode-se variar o número de arestas de corte, velocidade de corte, pressão de corte, velocidade de alimentação, sentido da usinagem entre outros. Porém a maioria dessas variações buscam primeiramente o melhor consumo da matéria prima, melhorar a produtividade e aumentar a qualidade através de sistemas de monitoramento. Mas de acordo com Aguilera e Martin (2001) para se obter uma qualidade superficial desejada, somente é possível através da obtenção e avaliação dos valores de rugosidade.

Dependendo da superfície e do material avaliado, a definição de qualidade superficial pode ter uma grande variação, conforme o comprimento de amostragem (MALDONADO, 1998). As irregularidades de forma e de estado da superfície usinada podem ser definidas geometricamente em seis níveis:

1ª ordem: diferença de forma e deposição que indicam uma zona de tolerância em relação a um referencial específico;

2ª ordem: caracteriza as ondulações de um perfil, de caráter periódico devida às vibrações de baixas frequências de peça ou da ferramenta;

3ª e 4ª ordens: a rugosidade em si, regular ou de alta frequência, decorrente do avanço, da geometria e qualidade de afiação da ferramenta, e do material;

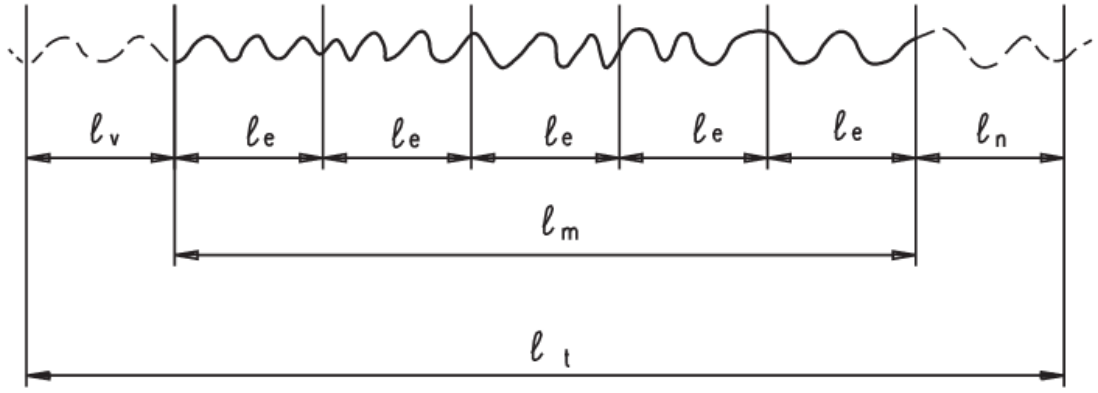
5ª e 6ª ordens: dependem da estrutura físico-química, além do domínio da metrologia.

Sistemas de medição de Rugosidade

Usualmente existem dois sistemas básicos de medida: o da linha média (M) e o da envolvente (E). No Brasil, pelas Norma ABNT NBR 6405/1988, é adotado o sistema da linha média (M).

As normas NBR 4287/2002, NBR 4288/2008 e NBR 6405/1988 padronizaram os parâmetros e critérios para avaliação da rugosidade no apalpamento mecânico onde deve se estabelecer um comprimento de medição (lm), com cinco comprimentos de amostragem (le) chamados de "*cut-off*" como pode-se observar na Figura 12.

Figura 12 - Comprimentos de amostragem.



Fonte: NBR 6405/1988.

Onde:

le: comprimento de amostragem (*"cut-off"*);

lm: comprimento de medição – trecho considerado no perfil rugosidade utilizado diretamente na avaliação;

lt: comprimento total de medição;

lv: comprimento para atingir a velocidade de medição do apalpador;

ln: comprimento para parada do apalpador.

Os valores de lv e ln são descartados depois da medição pois são os estágios de aceleração e desaceleração do rugosímetro.

O "*cut-off*", de acordo com a norma NBR 6405/1988 deve ser escolhido de acordo com o Quadro 4, sendo que os aparelhos de medição, conhecidos como rugosímetros, apresentam os valores limites de "*cut-off*" padronizados.

Quadro 4 - Comprimento de amostragem para perfis não periódicos(*"cut-off"*).

Rugosidade Média Ra (µm)	**Mínimo Comprimento (le) "*cut-off*" (mm)**
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10,0	2,5
Maior que 10,0	8

Fonte: ABNT – NBR 6405/1988.

3.7.6. Rugosidade Média - R_a

Nesta pesquisa utilizou-se a rugosidade média (Ra) que é definida pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro de um percurso de medição. Segundo Hecker & Liang (2003) pode ser definida matematicamente da seguinte forma (Equação 1):

$$Ra = \frac{1}{L} \times \int_0^L |y - y_{CL}| dl \quad (1)$$

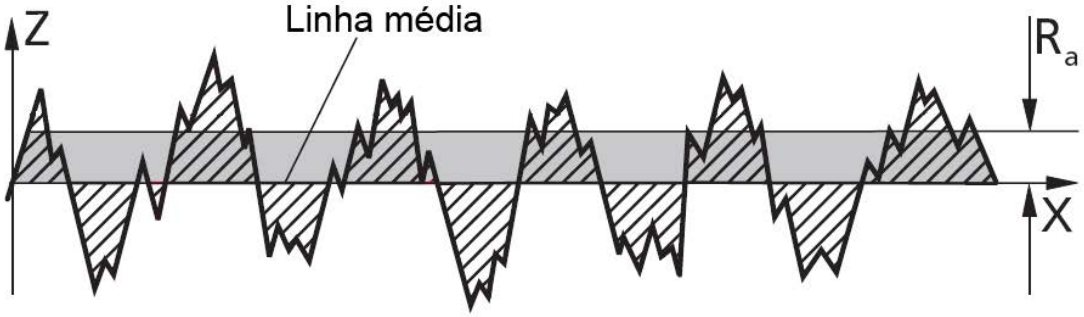
Onde: L é o comprimento de medição;

y é a altura do pico ou a profundidade do vale;

y_{CL} é a variável que define o posicionamento da linha de centro (as áreas localizadas abaixo e acima desta linha são idênticas)

O valor de rugosidade média (Ra) corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem (Figura 13).

Figura 13 - Rugosidade média (R_a).



Fonte: MAHR, 2010 adaptado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em 2 etapas distintas, a primeira foi a montagem de um sistema de aquisição de dados desenvolvido para a avaliação do processo de lixamento, a segunda foi a confecção e preparo dos corpos de prova bem como a realização dos ensaios. Neste tópico serão descritos detalhadamente a confecção do suporte para a fixação do corpo de prova, a metodologia aplicada para a confecção dos corpos de prova, aquisição dos dados e o detalhamento da realização dos ensaios.

4.1.MATÉRIA-PRIMA E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As madeiras utilizadas nos ensaios de lixamento foi uma tora de *Pinus elliottii*, proveniente de floresta plantada no sudeste do estado de São Paulo com aproximadamente 40 anos de idade, e uma árvore de *Corymbia citriodora* proveniente da região de Bauru. Essas duas espécies foram escolhidas devido a diferença entre os valores de rugosidade das mesmas.

Essas peças de *Corymbia citriodora* chegaram em seções quadradas com dimensões de 40x40x1200mm. Já a madeira de pinus chegou em toras as quais foram processadas no Laboratório de Processamento da Madeira na UNESP *campus* de Itapeva.

As condições de preparação dos corpos de prova foram idênticas de maneira a não influenciar o processo de lixamento. Os corpos de prova foram preparados em duas etapas:

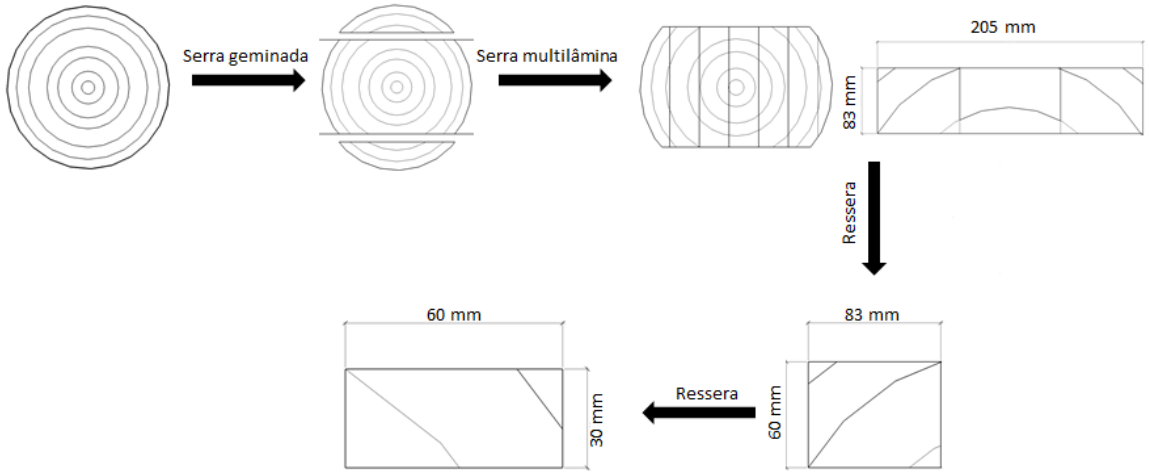
- Desdobro primário e secundário (Apenas para o *Pinus elliottii*);
- Acabamento e climatização dos corpos de prova (*Pinus elliottii e Corymbia citriodora)*;

4.1.1. Desdobro primário e secundário

Realizou-se o desdobro primário da tora de *Pinus elliotti* em uma serra de fita geminada da marca FaberNew modelo SFG - 1100 retirando-se desta operação a peça denominada semi-bloco. Em seguida, esses semi-blocos foram para um desdobro secundário em uma serra multilâminas da marca FaberNew, modelo CMB 210, onde foram retiradas cinco pranchas, de cada espécie, com as seguintes dimensões: 3500 x 83 x 250 mm. As pranchas de pinus foram enumeradas de um a cinco para realização de um sorteio para a escolha de duas pranchas da espécie. 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 confeccionadas seis peças em uma resserra da marca FaberNew modelo DRP - 110V2 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 climatizadas, em uma câmara climatizada, 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 em que foi realizado a 1ª etapa de preparação dos corpos de prova estão representados na Figura 14.

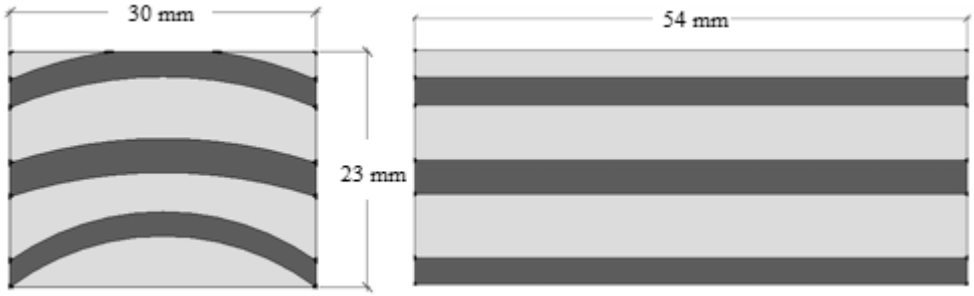
Figura 14 - Esquema da primeira etapa de preparação dos corpos de prova.



4.1.2. Acabamento e climatização dos corpos de prova

Nessa etapa as peças de *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora* com dimensões de 1000 x 30 x 60 mm e 1200 x 40 x 40 mm, respectivamente, 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 corpos de prova foram preparados para que o lixamento fosse realizado na direção paralela às fibras com os planos de corte (tangencial e radial) aleatoriamente distribuídos. Preparou-se um total de 800 corpos de prova de cada espécie, os quais foram enumerados e devidamente climatizados de acordo com a NBR 07190/1997 para "classe de umidade 1 - 12% UE" em uma câmara climatizada da marca TECNAL modelo TE 4001. As dimensões finais dos corpos de prova foram 30 x 54 x 23 mm (Figura 15).

Figura 15 - Dimensões finais dos corpos de prova.



Após a climatização, os corpos de prova foram armazenados e vedados em sacos de polietileno a fim de evitar que houvesse reabsorção de umidade com o ambiente.

4.1.3. 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 uma balança de precisão com resolução 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 (2). Esta determinação foi realizada de acordo com a NBR 07190 para comprovação que a madeira entrou em equilíbrio com ambiente em aproximadamente 12% UE.

$$U(\%) = \frac{(m_i - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

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

m_i = massa de amostra úmida, em gramas;

m_s = massa de amostra seca, em gramas.

4.2.ANÁLISE FÍSICA DA MADEIRA

4.2.1. 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 resolução 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 resolução 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 (3).

$$D_{ap\,(12\%)} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \tag{3}$$

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.

4.2.2. 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 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 a resolução 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 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 (4).

$$D_b = \left(\frac{m_s}{m_v - m_i}\right) \times D_a \quad (4)$$

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;

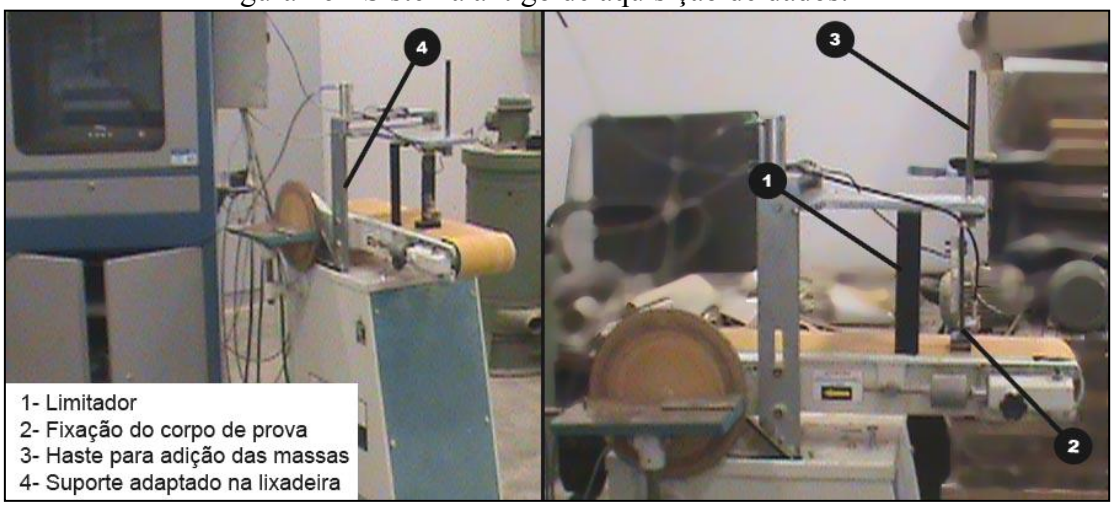
m_i = massa de amostra saturada imersa em água, em kg;

D_a = densidade da água a 25ºC.

4.3.MONTAGEM DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O primeiro sistema de aquisição de dados, apesar de ter se mostrado usual, continha alguns pontos os quais deviam ser melhorados (Figura 16).

Figura 16 - Sistema antigo de aquisição de dados.



Fonte: SANTIAGO, 2011.

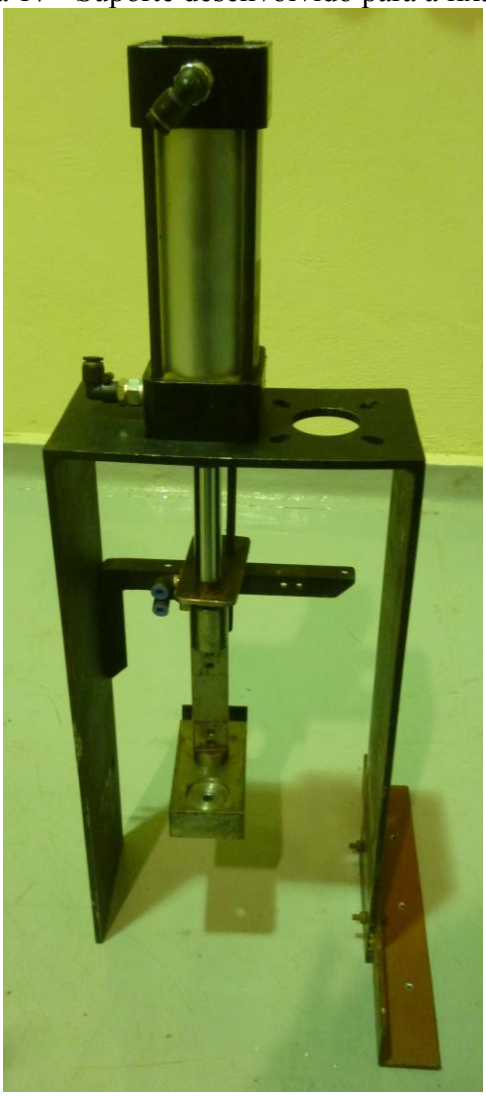
É importante minimizar esses fatores devido à complexidade de processamento da madeira, com isso, é de grande importância evitar falhas no processo devido vibração, riscos e dificuldades de operação da máquina. Este sistema foi projetado por Varasquim (2009) como uma proposta de se construir uma plataforma de ensaios de lixamento. Santiago (2011) realizou algumas mudanças no sistema, para a realização da parte experimental de sua dissertação de mestrado, como a inclusão de sensores de vibração, emissão acústica e a adição de um limitador para evitar que a peça fosse lixada em excesso e o suporte do corpo de prova entrasse em contato com a lixa.

Apesar do sistema de aquisição ter-se mostrado eficientes houve alguns itens nos quais esse deveria ser melhorado a fim de minimizar a influência de variáveis externas ao processo como:

- Posicionamento de sensores o mais próximos do processo de lixamento;
- Sistema de acionamento;
- Sistema de amortecimento;
- Sistema de fixação da peça.

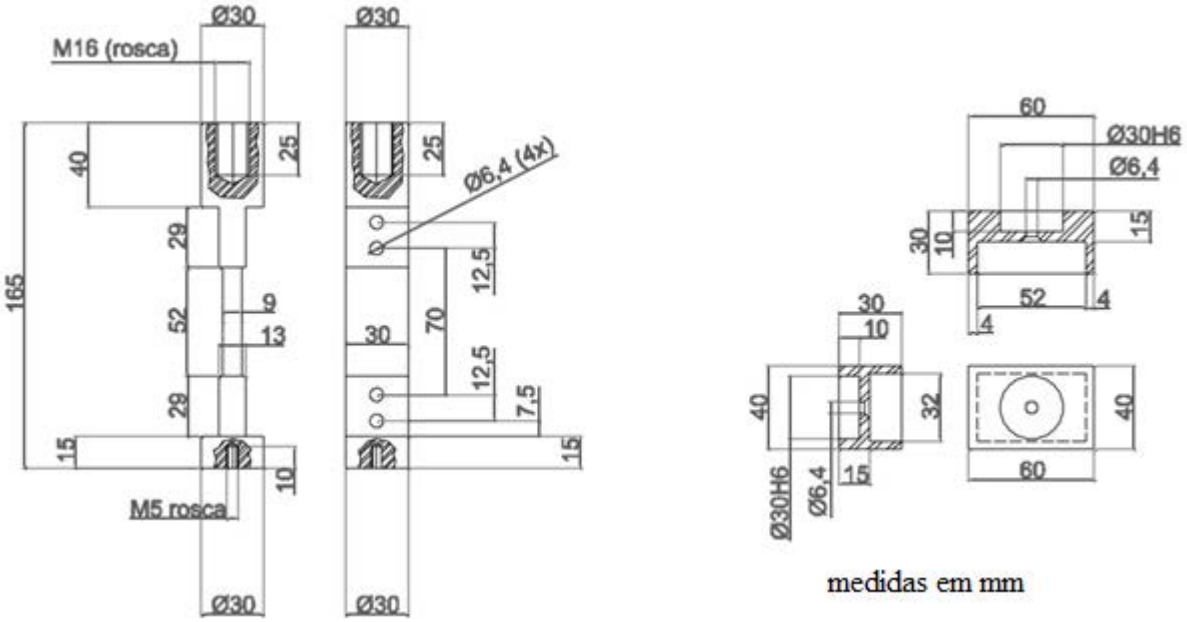
O suporte para ensaios de lixamento foi fabricado em aço ABNT 1010. Para a confecção desse suporte foi utilizada uma chapa de 6,4 mm de espessura. O esquema do projeto com as dimensões do suporte estão ilustrados na Figura 17.

Figura 17 - Suporte desenvolvido para a lixadeira



O suporte foi projetado para a fixação de um cilindro pneumático e na haste desse cilindro foi adaptado o sistema de aquisição de dados utilizado nesse trabalho. Sobre o suporte pneumático foi instalado um cilindro pneumático e na haste desse cilindro foi acoplado um suporte para a célula de carga e um suporte para o corpo de prova onde foram instalados os sensores de emissão acústica e vibração, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Projeto da haste e suporte do corpo de prova



Na Figura 19 é apresentado o suporte desenvolvido com os sensores já posicionados.

Figura 19 – Projeto da haste e suporte do corpo de prova

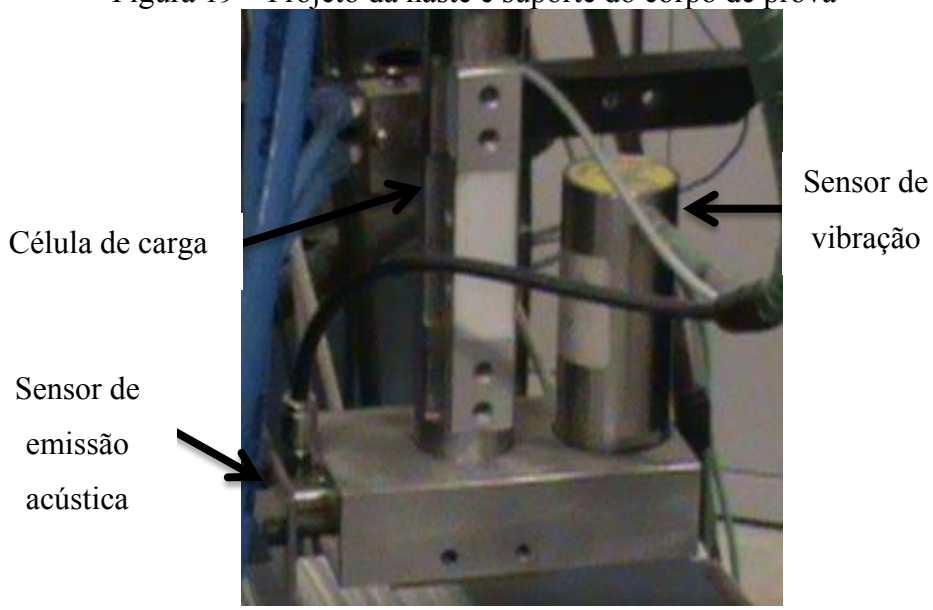
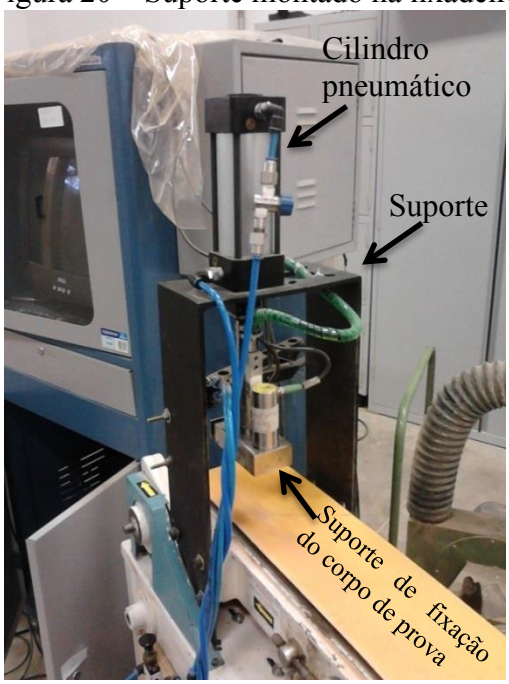


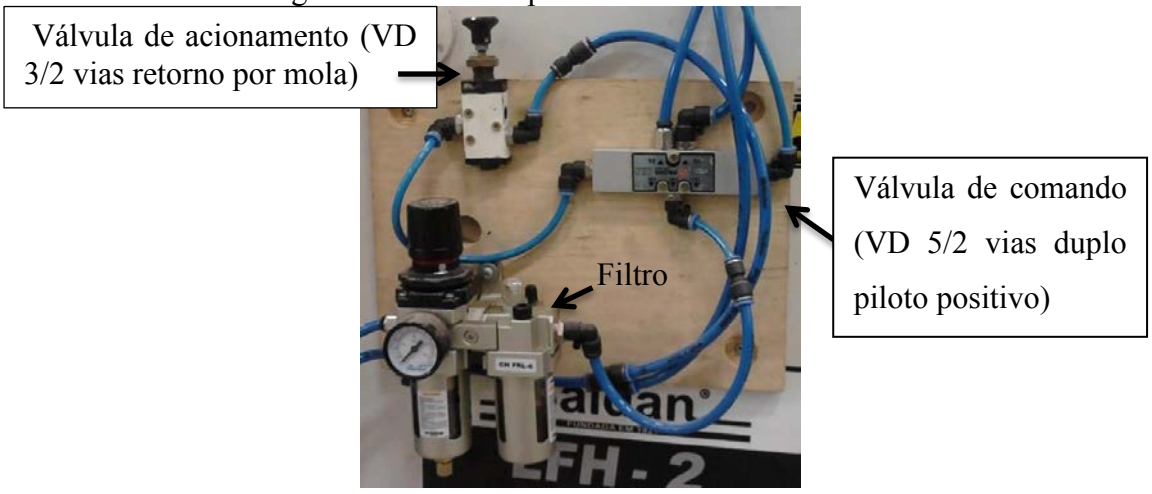
Figura 20 – Suporte montado na lixadeira



Também foi adaptado à lixadeira um circuito pneumático para melhor controle do ensaio, podendo garantir a altura que o material foi lixado. Esse circuito foi responsável pelo acionamento do pistão que exerce a pressão de lixamento sobre a peça. Além disso, a utilização do circuito pneumático ajudou o amortecimento no processo de lixamento. Na Figura 21 pode-se ver o painel de controle do circuito pneumático.

Com o sistema pneumático foi possível controlar com precisão a velocidade de avanço e saída do corpo de prova sobre a lixa.

Figura 21 - Circuito pneumático de acionamento.



4.4.LIXAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Nos próximos tópicos serão descritos o banco de ensaios, seus componentes e suas características bem como a metodologia aplicada na realização dos ensaios, também serão descritos os cálculos aplicados nas variáveis aquisitadas e todo planejamento experimental envolvido.

Para a realização dos ensaios de lixamento utilizou-se a lixadeira plana da marca BALDAN®, modelo LFH-2. As características da lixadeira são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Características da lixadeira plana da marca BALDAN®, modelo LFH-2.

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

4.4.1. Banco de ensaios

O banco de ensaios foi composto por uma lixadeira plana com um suporte projetado para fixação do corpo de prova, um cilindro pneumático para a variação das cargas aplicadas, 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.

4.5.SENSORES E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados foi composto por um transdutor de potência para a aquisição da corrente consumida do motor, um sensor de emissão acústica, um sensor de

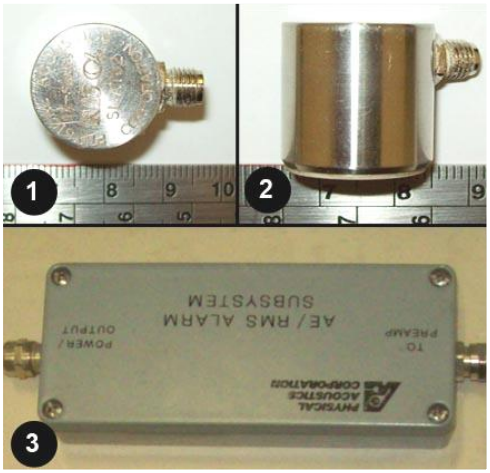
vibração, uma placa e um *software* de aquisição de dados. Todos esses equipamentos serão detalhados nesse tópico.

O módulo de emissão acústica foi 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 Quadro 6. O módulo de emissão acústica utilizado no experimento está apresentado na Figura 22.

Quadro 6 - Características técnicas do transdutor de corrente TRX-I/U.

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 inoxidável
Grau de proteção	IP 54
Freqüência do sensor R15A	150 kHz
Faixa de temperatura nominal	0 até +50 ºC

Figura 22 - Módulo de emissão acústica, sensor (1) (2) e amplificador (3).



Módulo de vibração é composto por um sensor piezelétrico (acelerômetro) para captação da vibração no sentido vertical da lixadeira plana e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca VIBROCONTROL, modelo TV100 que transmite um sinal proporcional de 4-20 mA (Figura 23).

Figura 23 - Módulo de vibração da marca Vibrocontrol modelo TV100.

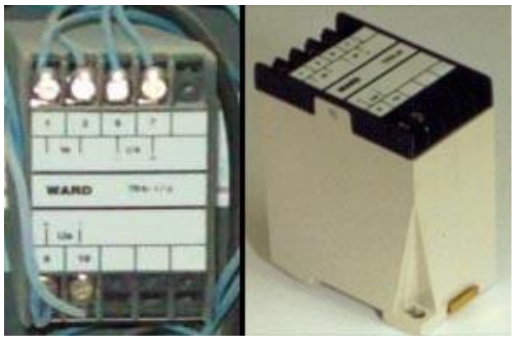


Transdutor de corrente alternada monofásico para captação da potência consumida do motor durante o processo de lixamento, marca WARD modelo TRX-I/U. As características técnicas do transdutor de corrente alternada constam no Quadro 7. A forma do transdutor de corrente é apresentada na Figura 24.

Quadro 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
Frequência nominal	50 – 60 Hz
Tempo de resposta	250 mS
Faixa de temperatura nominal	-5 até +55ºC

Figura 24 - Transdutor de corrente modelo TRX-I/U.

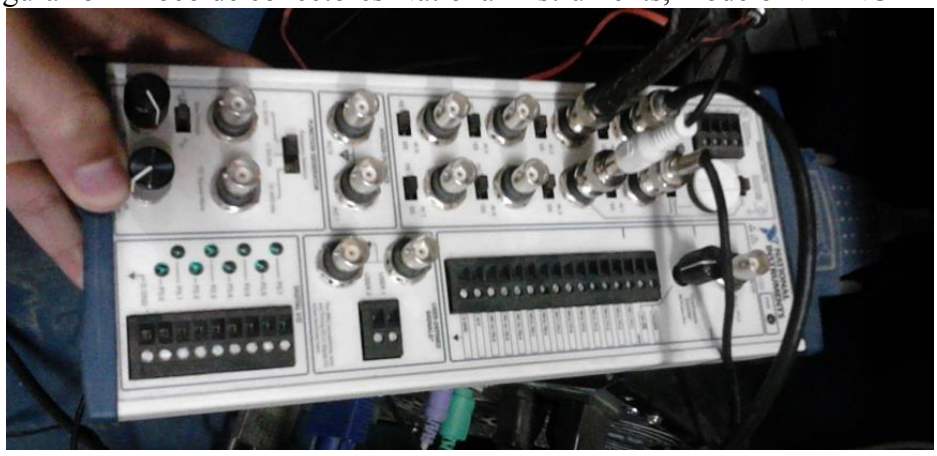


Bloco de conectores e cabo de ligação placa/bloco de conectores, da marca *National Instruments*, modelo do bloco de conectores NI BNC 2120 e modelo do cabo SHC68-EPM (2m) 192061-02 (Figura 25). A função do bloco de conectores é realizar a interface entre os sinais analógicos (enviados pelos sensores 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 no Quadro 8.

Quadro 8 - 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

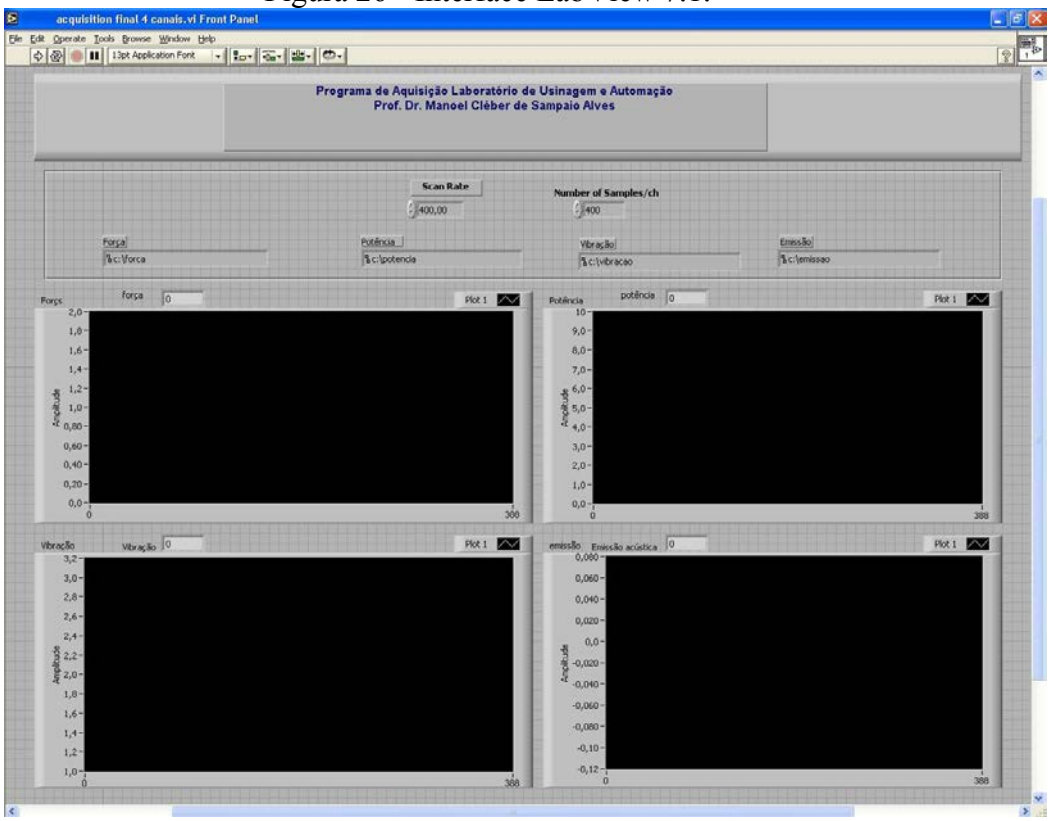
Figura 25 - Bloco de conectores National Instruments, modelo NI BNC 2120



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 programa utilizado para captação dos dados adquiridos pelos sensores foi feito no *software* 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 26.

Além dos componentes citados, o sistema de monitoramento e aquisição de dados possui um microcomputador 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 frequência 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.

Figura 26 - Interface LabView 7.1.



4.6.MATERIAL E ACONDICIONAMENTO DAS LIXAS

As lixas utilizadas no experimento foram climatizadas e acondicionadas de acordo com a norma NBR 14960/2003. Foram colocadas em um armário, Figura 27, devidamente climatizado para que se pudessem atender as condições ideais que correspondem: 40% - 50% de umidade relativa com a temperatura ambiente variando entre 15 ºC - 29 ºC. As lixas utilizadas foram fabricadas com três tipos de abrasivos: óxido de alumínio, carbeto de silício e o óxido de zircônio. As granulometrias utilizadas correspondem a 80, 100, 120 *mesh* produzidas pelo fabricante NORTON abrasivos (óxido de alumínio e óxido de zircônio) e Deerfos (carbeto de silício).

O acondicionamento se faz importante devido a absorção e perda de umidade das lixas fazendo com que o material do seu costado mude de características assim ficando menos resistente. Com essa perda de resistência os grãos podem se soltar mais facilmente bem como o costado pode romper durante o processo de lixamento.

Figura 27 - Acondicionamento das lixas.



4.7.CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE LIXAMENTO

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 processo de lixamento e seus níveis, sendo os seguintes: Tipo do grão

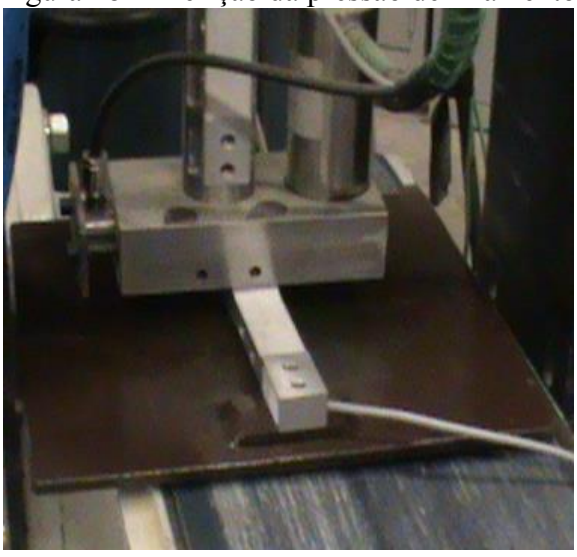
abrasivo (GA_n), Desgaste do grão abrasivo (D_n), Espécie da madeira (E_n) e Granulometria da lixa (G_n). Os níveis dos fatores estabelecidos no experimento se apresentam no Quadro 9.

Quadro 9 - Fatores e níveis variados no projeto.

Fatores		
Espécie da madeira		
E_1	E_2	
Pinus elliottii	*Corymbia citriodora*	
Grãos Abrasivos		
GA_1	GA_2	GA_3
Óxido de alumínio	Carbeto de Silício	Óxido de Zircônio
Granulometria das lixas		
G_1	G_2	G_3
80	100	120
Desgaste do abrasivo		
D_1	D_2	D_3
Lixa nova	4 min	8 min

O restante dos fatores testados foram fixados em um único nível, direção do lixamento (paralelo às fibras), velocidade de corte (11 m/s) e a pressão específica de lixamento (1 $kgf.mm^{-2}$) Para se aferir a pressão de lixamento utilizou-se uma célula de carga como balança que foi submetida a uma pressão exercida pelo pistão pneumático até que o sistema se encontrasse com a carga desejada (Figura 28).

Figura 28 - Aferição da pressão de lixamento



Foram aquisitados 400 pontos por segundo e a geração de um arquivo de texto no formato matricial, fez-se necessário criação de 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.

4.8.METODOLOGIA UTILIZADA NOS ENSAIOS

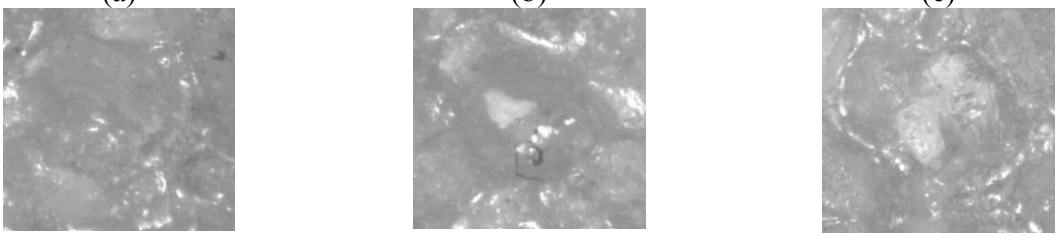
Após a umidade dos corpos de prova se estabilizar em 12% UE foram selecionados 200 amostras de cada espécie para a realização dos ensaios. O motivo pelo qual foram selecionados mais corpos de prova do que a quantidade necessária foi devido à possibilidade de falha de operação ou funcional do sistema. Dentro da seleção dos corpos de prova utilizou-se a massa como principal critério de seleção, pois há grande variação de massa existente nos corpos de prova com as mesmas dimensões. Para uma melhor uniformização foram selecionados os corpos de prova com a massa entre 14 a 18 gramas para o *Pinus elliottii* e de 32 a 36 gramas para a *Corymbia citriodora*.

Após a seleção dos corpos de prova pela densidade foram realizados os ensaios de lixamento, onde o operador do sistema acoplava o corpo de prova no suporte da célula de carga e o fixava com dois parafusos. Depois do corpo de prova fixado era colocado o nome do arquivo na interface do Labview® para diferenciar os arquivos de acordo com o tipo ensaio que estava sendo realizado.

Sempre que havia a realização de seis repetições mantinha-se a lixa e realizavam-se as seis repetições da outra espécie. Depois disso a lixa era limpa com um pedaço de teflon para retirar o pó de serra dos espaços vazios e então era realizado o desgaste. O desgaste foi realizado com uma barra de aço 4340, temperado e revenido com dureza 54 HRc, com quatro quilos durante quatro minutos; mais uma vez eram realizados os ensaios, a limpeza da lixa e após isso mais quatro minutos de desgaste para se atingir a condição mais severa de desgaste abrasivo, como pode ser observado na Figura 29. As imagens foram obtidas de um microscópio com aumento de 50x. Esse procedimento foi realizado para todas as granulometrias e grãos abrasivos ensaiados durante a parte experimental. A rugosidade média (Ra) foi medida através de um rugosímetro apalpador com ponta de diamante e o valor de rugosidade do corpo de prova era medido através da média de seis valores medidos perpendicularmente ao perfil lixado.

Figura 29 - Desgaste dos grãos abrasivos: (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste e (c) 8 minutos de desgaste

(a) (b) (c)



Após todos os dados serem aquisitados foram gerados 324 arquivos de potência de lixamento, emissão acústica e vibração. Estes foram gerados na extensão de texto (txt) e em duas colunas. Para trabalhar esses dados de forma mais ágil foram criadas rotinas de trabalho para o software Matlab®, que tinham como função dispor os dados em uma matriz de coluna única e filtrar o máximo de ruído possível. Depois disso, esses arquivos foram tabulados no Microsoft Excel® onde foram realizados ensaios estatísticos para verificar a correlação entre as condições ensaiadas. As ferramentas estatísticas utilizadas foram a análise de variância e o teste de Tukey com 95% de significância para estudar a correlação entre os pares de variáveis. Para a realização dessas análises foi utilizado um *plug-in* gratuito do Excel chamado Action®. Depois os valores foram dispostos em gráficos e separados estatisticamente.

4.9.VARIÁVEIS MENSURADAS NO EXPERIMENTO

Em função da combinação dos níveis dos fatores do Quadro 8 foram mensuradas as seguintes variáveis de saída: potência consumida, emissão acústica, vibração, rugosidade superficial e análise da integridade superficial através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A seguir serão descritos os procedimentos utilizados nos cálculos e equipamentos empregados para essas variáveis.

4.9.1. Potência consumida

A potência consumida foi obtida através de um transdutor de corrente alternada, 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 5 o sinal adquirido (em VCC) foi transformado na unidade de potência (Watts).

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (5)$$

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 tensão é necessário converter o valor de tensão para corrente para que se possa aplicar esse valor na Equação 5. O fabricante do transdutor de corrente alternada fornece essa equação para a transformação do dado adquirido em tensão para corrente de acordo com a Equação 6.

$$I = \frac{U_{cc}}{2} \tag{6}$$

Onde: I = corrente, em Ampéres;

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

Substituindo o valor da corrente Equação (6), o valor da tensão de fase do motor da lixadeira (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor na Equação (5), têm-se a Equação (7), que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em tensão para potência consumida em Watts.

$$P_c = \frac{U_{cc}}{2} \times 220 \times 0{,}92 \times \sqrt{3} \tag{7}$$

4.9.2. Emissão Acústica

Para captação da emissão acústica foi utilizado o módulo de emissão acústica que é composto por um sensor (piezoelétrico) e um amplificador de sinal. O sinal que sai 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 é 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.

4.9.3. Vibração

Segundo Lima (1995) o sinal de vibração de vários processos de usinagem tem sido estudado para o monitoramento em tempo real de ferramentas de corte, onde a faixa de frequência para o monitoramento da vibração está entre 0 a 20.000 Hz, mas segundo o autor os pesquisadores limitam esta faixa em 8.000 Hz.

Ainda de acordo com Lima (1995) a vibração está sendo utilizada para captar o desgaste de ferramentas e avarias nos equipamentos, e a grande dificuldade encontrada pelos pesquisadores está na separação das faixas de frequências de vibrações referentes ao desgaste da ferramenta e avarias, que realmente interessa, dos diversos tipos de vibrações que estão envolvidos no processo de usinagem. O autor faz uma divisão de dois tipos de fontes de vibração geradas no processo de usinagem, a vibração forçada que é gerada por desbalanceamento de eixos, folgas nos mancais dos rolamentos, má lubrificação, quebra de engrenagem, etc., e a vibração auto-excitada que é gerada pelo contato peça-ferramenta.

Para conversão do sinal elétrico em valor de vibração, usou-se a Equação 8:

$$Vib = \frac{U_{cc}x25}{10{,}6} \tag{8}$$

4.9.4. Rugosímetro

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 30). Foi utilizado o parâmetro de rugosidade média (Ra) para avaliação da superfície da madeira. O comprimento de amostragem selecionado (Le) ou λc "cut-off" foi de 2,5 mm com Filtro Gaussiano Robust.

Figura 30 - Rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 25+.



4.10. ANÁLISE DE IMAGEM

Os ensaios que obtiveram os melhores valores de rugosidade média foi escolhido para a obtenção das imagens de microscopia eletrônica de varredura e verificação da topografia no microscópio confocal. As imagens foram geradas por um microscópio eletrônico de varredura e um microscópio confocal para a análise de topografia. Para a realização dos ensaios de imagem foi necessário cortar um cubo de madeira com aresta de um centímetro.

4.10.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Usou-se o microscópio eletrônico de varredura marca Zeiss, modelo EVO LS-15 com aberturas para o modo EP (pressão estendida), em atmosfera de N2, a 5 kV (microscopia de baixa voltagem) em pressões da ordem de 60 Pa, coletando o sinal de elétrons retro espalhados com o detector VPSE-G3 (Figura 31). Este microscópio está instalado no campus da Unesp de Guaratinguetá, na Faculdade de Engenharia.

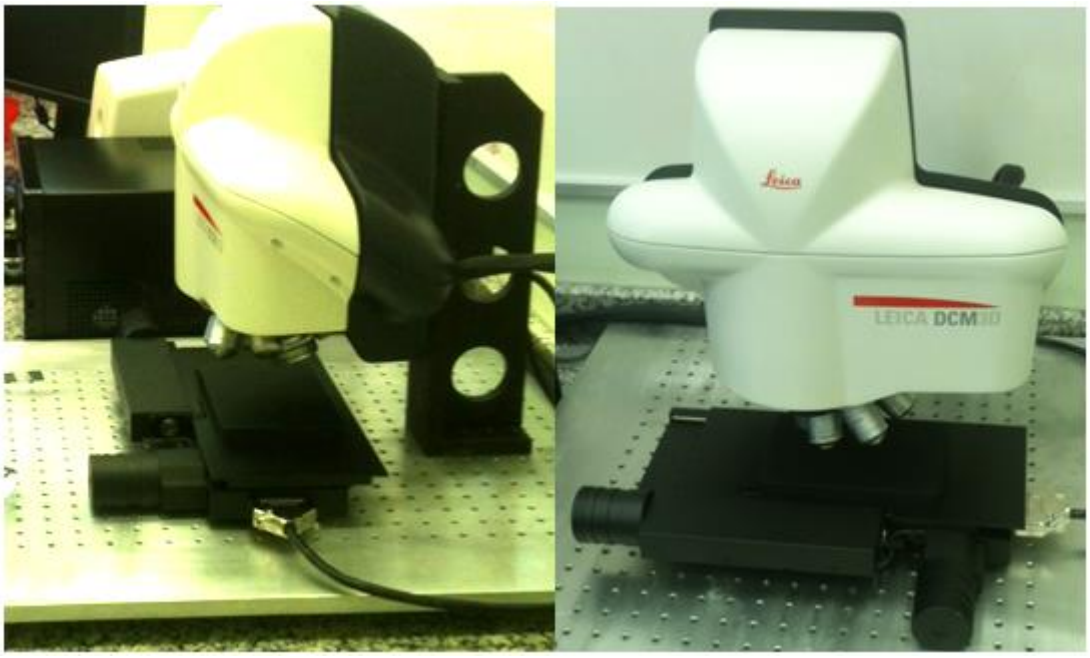
Figura 31: Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15



4.10.2. Topografia das superfícies

Usou-se o interferômetro da marca Leica e modelo DCM-3D (Figura 32). Este microscópio está instalado no campus da Unesp de Guaratinguetá, na Faculdade de Engenharia.

Figura 32 – Interferômetro da marca Leica modelo DCM-3D.



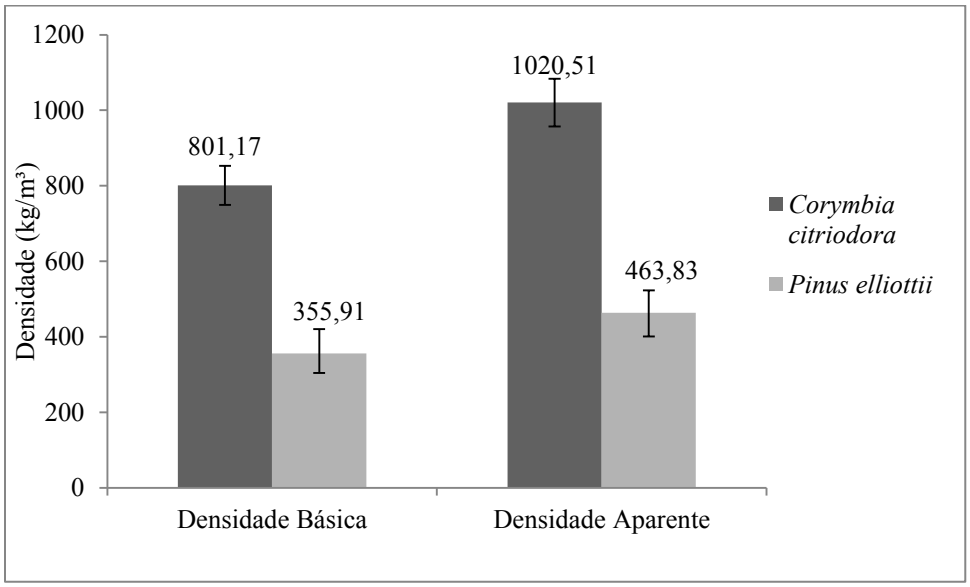
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos serão mostrados abordando sempre as duas espécies, *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*, e será mostrada a influência da granulometria em todas as variáveis analisadas. Após, será abordada a influência do desgaste de cada granulometria nas variáveis do processo. Em cada tipo de variável serão apresentados os gráficos referentes as três classes de abrasivos (óxido de alumínio, carbeto de silício e óxido de zircônio), ao término de cada variável será traçado um comparativo entre os grãos abrasivos avaliando a influência da sua granulometria e desgaste.

5.1.DENSIDADE BÁSICA E APARENTE

Na Figura 33 são apresentados os valores obtidos de densidade básica e aparente das madeiras utilizadas nos ensaios de lixamento.

Figura 33 - Densidade básica e densidade aparente das espécies utilizadas



Segundo Ferreira (2003) a densidade básica do *Pinus elliottii* pode variar, usualmente, entre 400 a 420 kg/m³, enquanto o *Corymbia citriodora* possui um valor médio de 867 kg/m³. Quando comparados com os valores obtidos nota-se que são valores próximos do que a bibliografia sugere. Essa diferença se deve às condições de crescimento da árvore, localização

da retirada do corpo de prova ao longo do tronco da árvore, quantidade de madeira juvenil e madeira adulta nos corpos de prova entre outras.

Com relação à densidade aparente, o esperado era para *Corymbia citriodora* 1040 kg/m³ e para *Pinus elliottii* 480 kg/m³, em 12% de umidade (FERREIRA, 2003). Nesse caso os valores obtidos foram muitos próximos aos da literatura, confirmando o tipo de espécie utilizado.

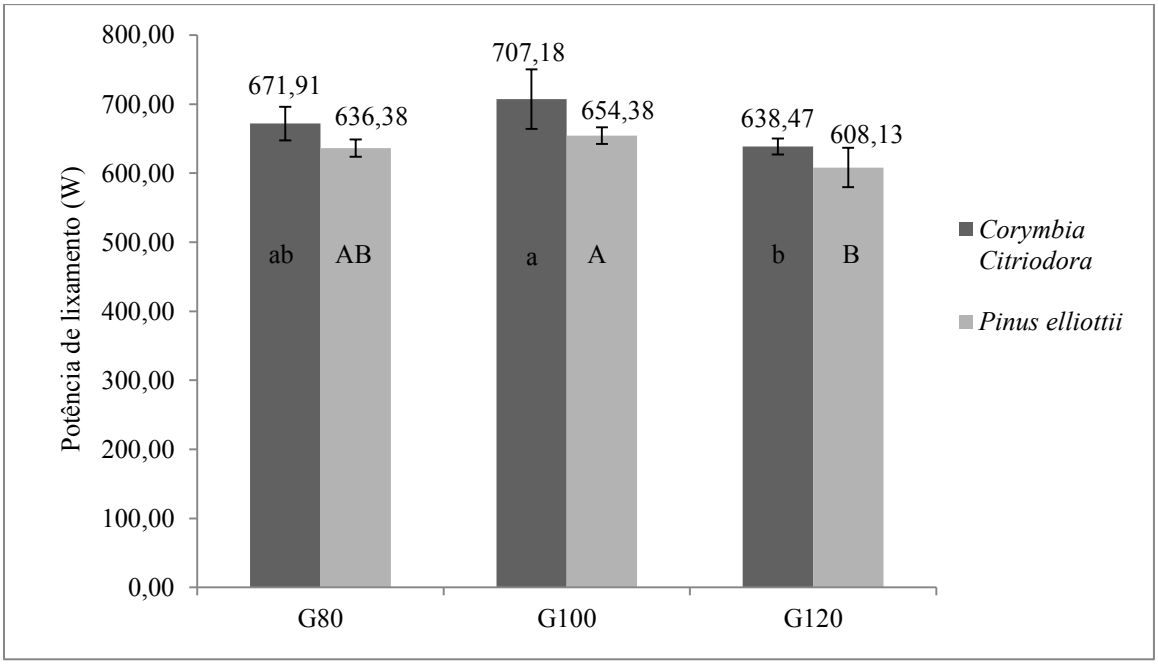
5.2.VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA

5.2.1. Óxido de Alumínio

5.2.1.1.Potência de Lixamento

Na Figura 34 são apresentados os valores obtidos de potência de lixamento com os grãos de óxido de alumínio, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Figura 34 - Variação da potência de lixamento do *Corymbia citriodora* e Pinus elliottii de acordo com a granulometria da lixa de óxido de alumínio.



Pode-se perceber que estatisticamente os valores obtidos na potência de lixamento na lixa de granulometria de 80 *mesh* não diferem dos demais e isso vale para as duas espécies

ensaiadas. Quando analisadas as outras duas granulometrias (100 e 120 *mesh*) nota-se que os ensaios são estatisticamente diferentes. Isso ocorre devido à falta de eficiência para a remoção de grandes vales na superfície da madeira, sendo assim, quando se realiza o lixamento com grãos menores esses grãos não conseguem remover grandes imperfeições.

Porém os valores não possuem uma grande diferença entre seus máximos e mínimos. Analisando os valores percebe-se que o maior valor de potência de lixamento na *Corymbia citriodora* é cerca de 10% maior que o menor valor obtido, enquanto essa relação é menor que 8% de diferença quando analisados os valores obtidos no lixamento de *Pinus elliottii*.

Avaliando o processo de lixamento nota-se entre as granulometrias que o menor valor de potência foi obtido utilizando a lixa com granulometria de 120 *mesh* para ambas as espécies e o maior valor foi obtido com a lixa com granulometria de 100 *mesh*.

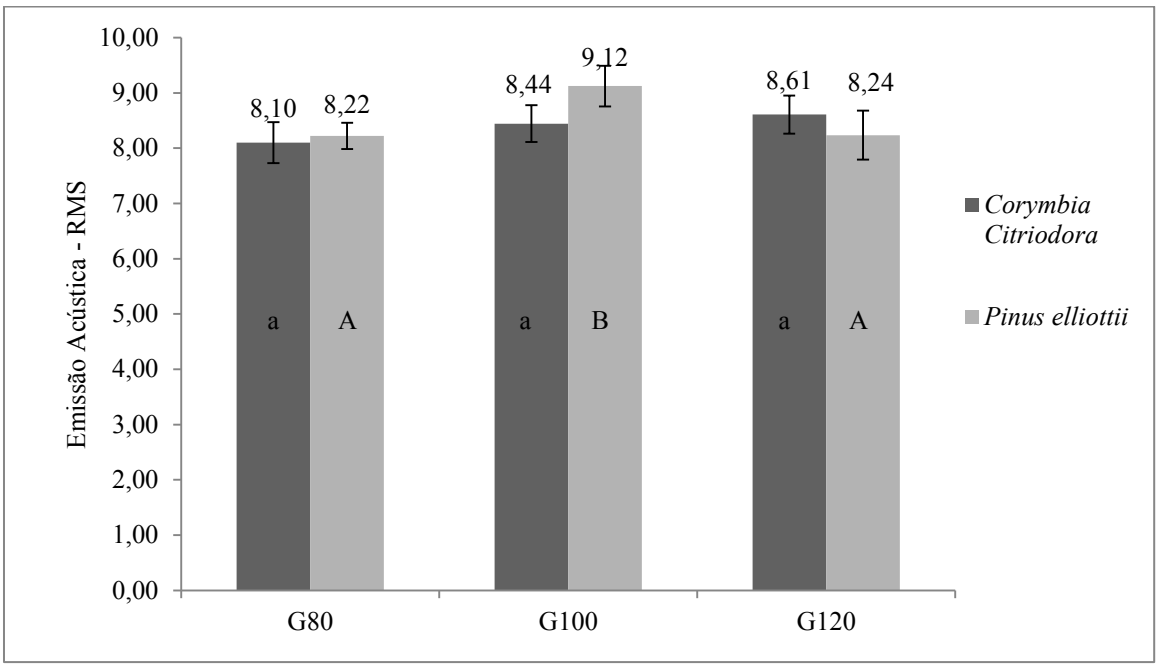
Avaliando consumo de potência através das espécies nota-se que todos ensaios envolvendo o *Pinus elliottii* obtiveram menores valores de potência de lixamento quando comparados com a *Corymbia citriodora*. Esse fato é explicado pela maior densidade que a *Corymbia citriodora* tem comparada com o *Pinus elliottii*, isto é, maior quantidade de material num mesmo volume.

5.2.1.2.Emissão acústica

Na Figura 35 são apresentados os valores obtidos de emissão acústica durante o processo de lixamento com os grãos de óxido de alumínio, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Para a emissão acústica, quando analisamos os valores obtidos com o lixamento da *Corymbia citriodora,* todas as lixas são consideradas estatisticamente iguais, e no *Pinus elliottii* os ensaios realizados com as granulometrias de 80 e 120 *mesh* são considerados estatisticamente iguais. Esse comportamento pode ser explicado pela diferença de densidade dos materiais e pela baixa variação granulométrica. As lixas utilizadas nesse trabalho são consideradas de granulometria média e indicadas para um lixamento preliminar, segundo Hawks (1995). Já quando analisamos o *Pinus elliottii* nota-se que a lixa com granulometria de 100 *mesh* se diferencia estatisticamente das outras.

Figura 35 - Variação da emissão acústica no lixamento de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de alumínio.



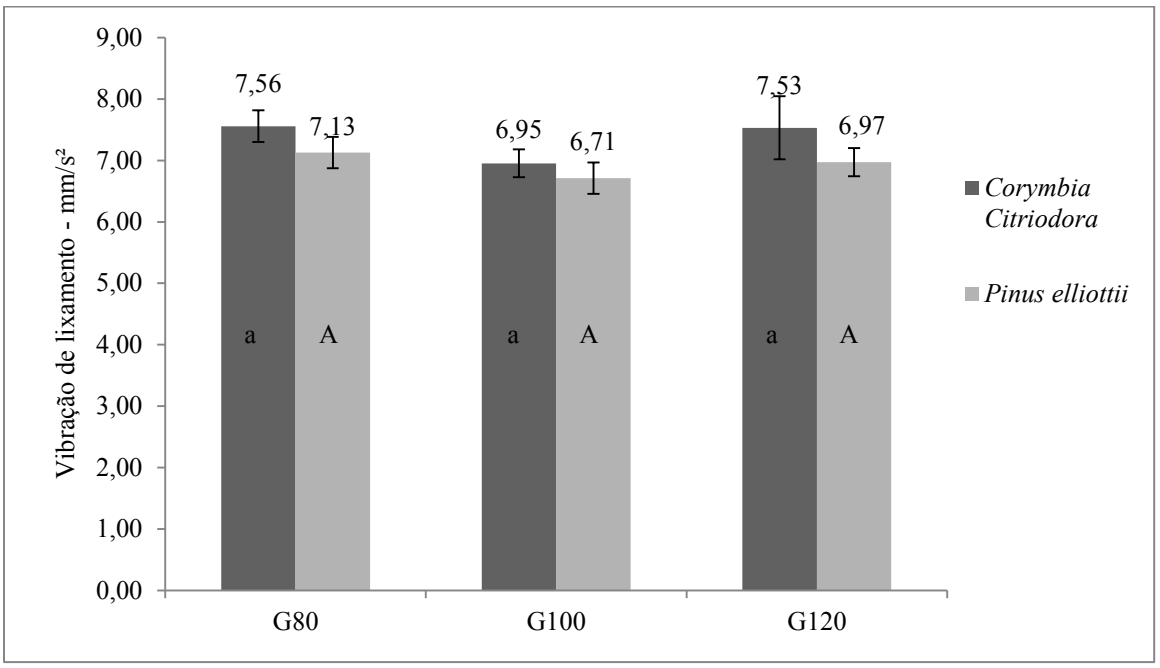
Na *Corymbia citriodora* nota-se que há uma tendência de emissão acústica aumentar de acordo com a diminuição do grão abrasivo, isso se dá devido ao aumento da área de contato com o grão abrasivo e a peça. Enquanto no *Pinus elliottii* o maior valor obtido foi com a granulometria de 100 *mesh*, e a menor com a granulometria de 80 *mesh*. Novamente pode-se notar que há uma baixa variação entre os valores obtidos nos ensaios para ambas as espécies.

5.2.1.3.Vibração

Na Figura 36 são apresentados os valores obtidos de vibração durante o processo de lixamento com os grãos de óxido de alumínio, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Entre os ensaios de vibração realizados não houve variação estatística. Das três variáveis analisadas durante o processo essa foi a que teve menor variação entre seus máximos e mínimos.

Figura 36 – Variação da vibração no lixamento de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de alumínio.



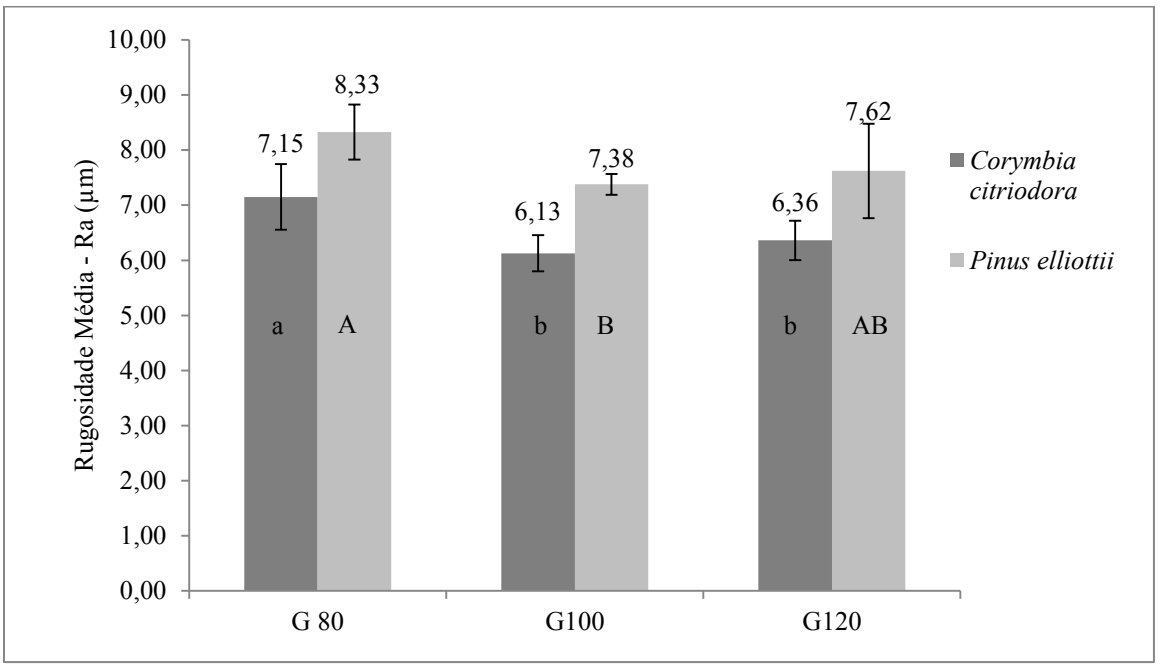
Nesta variável os menores valores obtidos foram com a granulometria de 100 *mesh* para ambas as espécies. Isso se deve ao fato de nessa granulometria o grão abrasivo cortar mais o material do que deslizar e/ou compactar material na superfície. Devido a isso a lixa de granulometria 100 obteve maiores valores de potência de corte e no ensaio de *Pinus elliottii* maior valor de emissão acústica.

Mais uma vez todos os valores de vibração foram menores no *Pinus elliottii* quando comparados nas mesmas condições com os valores obtidos no lixamento de *Corymbia citriodora*.

5.2.1.4.Rugosidade média - Ra

Na Figura 37 são apresentados os valores obtidos de rugosidade durante o processo de lixamento com os grãos de óxido de alumínio, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Figura 37 – Rugosidade obtida no lixamento de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de alumínio.



A análise estatística nos mostra que a rugosidade obtida na *Corymbia citriodora* é estatisticamente igual entre as lixas de granulometria 100 e 120 *mesh*, no *Pinus elliottii* as rugosidades são similares estatisticamente entre os conjuntos de lixas 80 e 120 e 100 e 120 e os valores são estatisticamente diferentes quando comparamos as lixas de granulometria 80 e 100 *mesh*.

Os menores valores de rugosidade foram obtidos utilizando a lixa com granulometria de 100 *mesh*, para ambas as espécies, e os maiores valores com a lixa de 80 *mesh*. Isso ocorre devido ao tamanho do grão abrasivo. Enquanto o grão com granulometria de 80 *mesh* consegue remover maiores imperfeições ele acaba criando grandes rasgos, já a lixa de 120 *mesh* é o menor grão abrasivo conseguindo apenas remover pequenas imperfeições e diminuir as grandes. Já o grão com granulometria de 100 *mesh* tem um tamanho mediano que consegue amenizar as grandes imperfeições sem causar um grande dano sobre a superfície devido suas arestas cortantes. Esse fato já foi discutido por Hoadley (2000) mostrando a importância da utilização de granulometrias progressivamente durante as etapas de lixamento afim de se evitar que grandes imperfeições continuem na superfície do material.

Varasquim *et al.*(2012) ao lixar *Eucalyptus grandis* também perceberam que os melhores valores de rugosidade foram encontrados com a lixa de granulometria 100, porém os

valores entre as lixas 100 e 120 foram bastante similares. O que também aconteceu nesta pesquisa.

Ao traçar uma comparação entre rugosidade e as variáveis mensuradas durante o processo de lixamento (potência de lixamento, emissão acústica e vibração) nota-se que a lixa com a granulometria de 100 *mesh* foi a que obteve os maiores valores na potência de lixamento e os menores valores de vibração. Quando analisamos a emissão acústica a lixa 100 *mesh* obteve maior valor no *Pinus elliottii* e um valor estatisticamente similar ao maior valor na *Corymbia citriodora*. Esses valores maiores atestam que o grão abrasivo possuía um maior contato com a superfície do corpo de prova, já o menor valor de vibração também auxilia a obtenção de menor rugosidade, pois quanto menor a vibração no processo melhor o funcionamento da interface grão abrasivo junto à peça a ser lixada.

5.2.2. Carbeto de silício

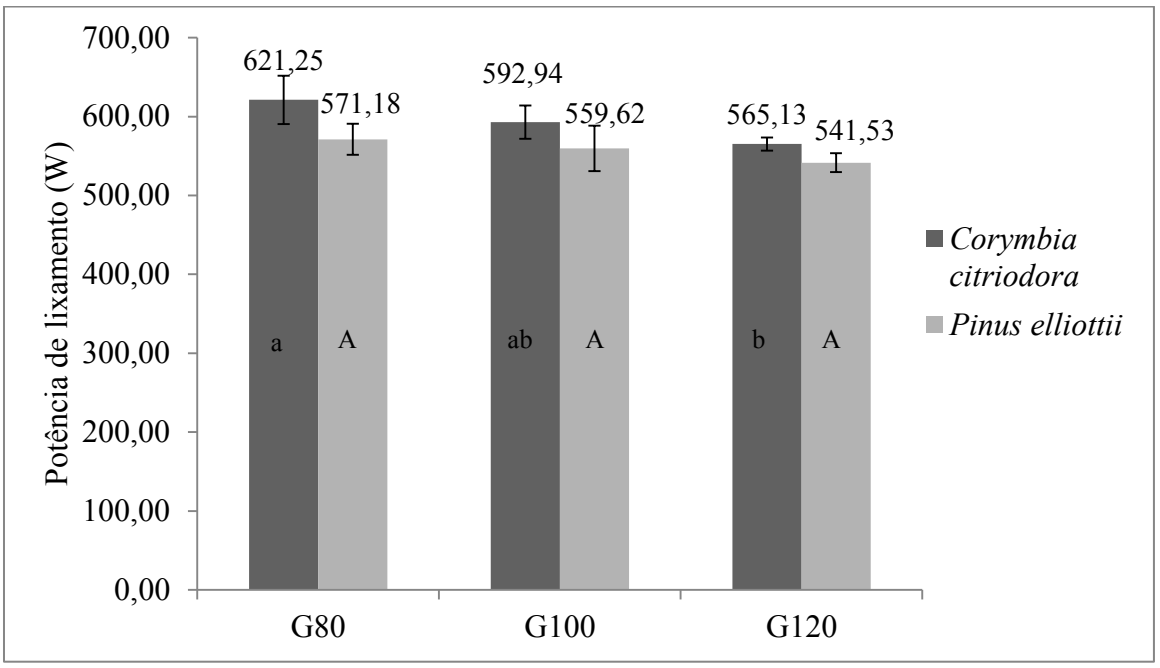
5.2.2.1. Potência de lixamento

Na Figura 38 é apresentada a variação dos valores de potência de lixamento devido a variação da granulometria na lixa de carbeto de silício bem como a análise estatística utilizada.

Ao analisarmos os resultados obtidos primeiramente nota-se que para o *Pinus elliottii* não houve variação quando comparamos os valores estatisticamente pelo teste de Tukey, com uma significância de 95%. Enquanto para a *Corymbia citriodora* os ensaios com as lixas de granulometria 80 e 120 *mesh* se diferem quando comparados estatisticamente, e a lixa de granulometria 100 *mesh* é estatisticamente semelhante as outras duas variações de granulometria.

Apesar desses valores serem estatisticamente muito próximos nota-se que há uma certa tendência da potência de corte diminuir com a diminuição dos grãos abrasivos. Essa tendência é mais acentuada nos gráficos de *Corymbia citriodora*. Para ambas as espécies de madeira ensaiadas os menores valores de potência de corte foram encontrados nas lixas com granulometria de 120 *mesh* e os maiores com as lixas de granulometria de 80 *mesh*.

Figura 38 - Variação da potência de lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de carbeto de silício.



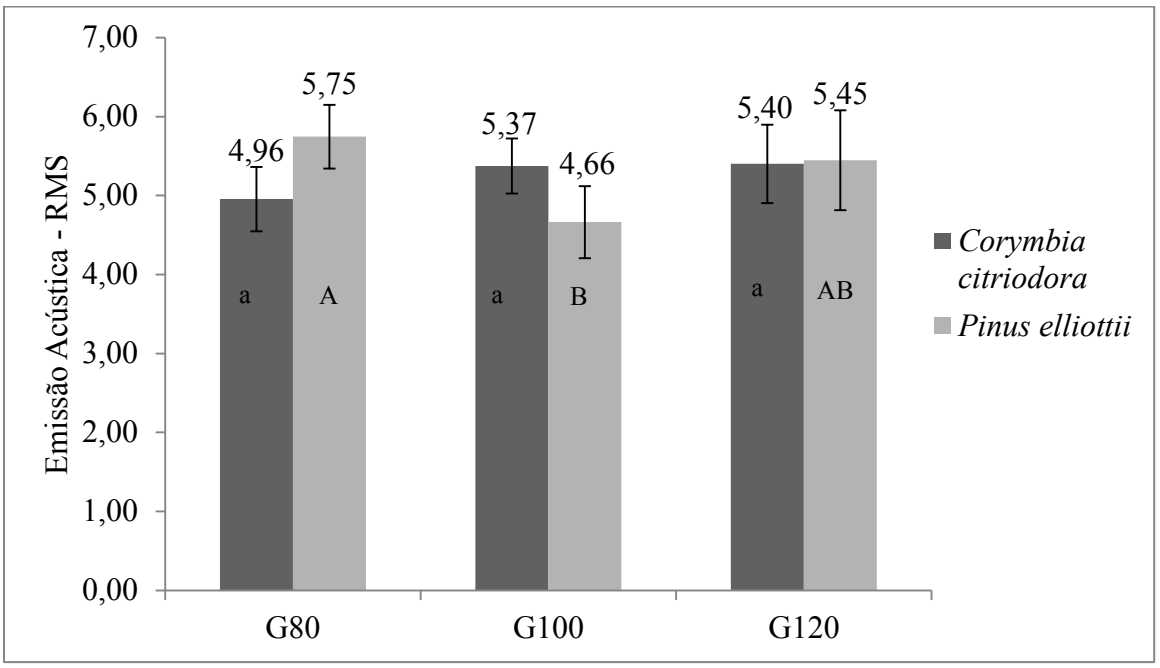
Essa tendência de diminuição do valor da potência pode ser justificada devido à maior superfície de contato entre o grão abrasivo e a peça, em especial o grão abrasivo de carbeto de silício que possui as arestas mais retas garantindo a melhor capacidade de auto fraturar (friabilidade) garantindo assim que o grão sempre permaneça com arestas cortantes.

Ao comparar os valores de potência obtidos entre as espécies percebe-se que para todas as granulometrias ensaiadas a *Corymbia citriodora* obteve maiores valores médios de potência. A maior diferença foi encontrada na lixa com granulometria de 80 *mesh*.

5.2.2.2.Emissão Acústica

Na Figura 39 são apresentados os valores de emissão acústica obtidos durante o processo de lixamento com os grãos de carbeto de silício, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Figura 39 - Variação da emissão acústica no lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de carbeto de silício.



Avaliando os resultados estatisticamente pode-se notar que não há variação entre os valores de emissão acústica obtidos no lixamento de *Corymbia citriodora* com a lixa de carbeto de silício, enquanto no *Pinus elliottii* as lixas com granulometria 80 e 100 *mesh* se diferenciam estatisticamente e a lixa de 120 *mesh* é estatisticamente igual às outras duas.

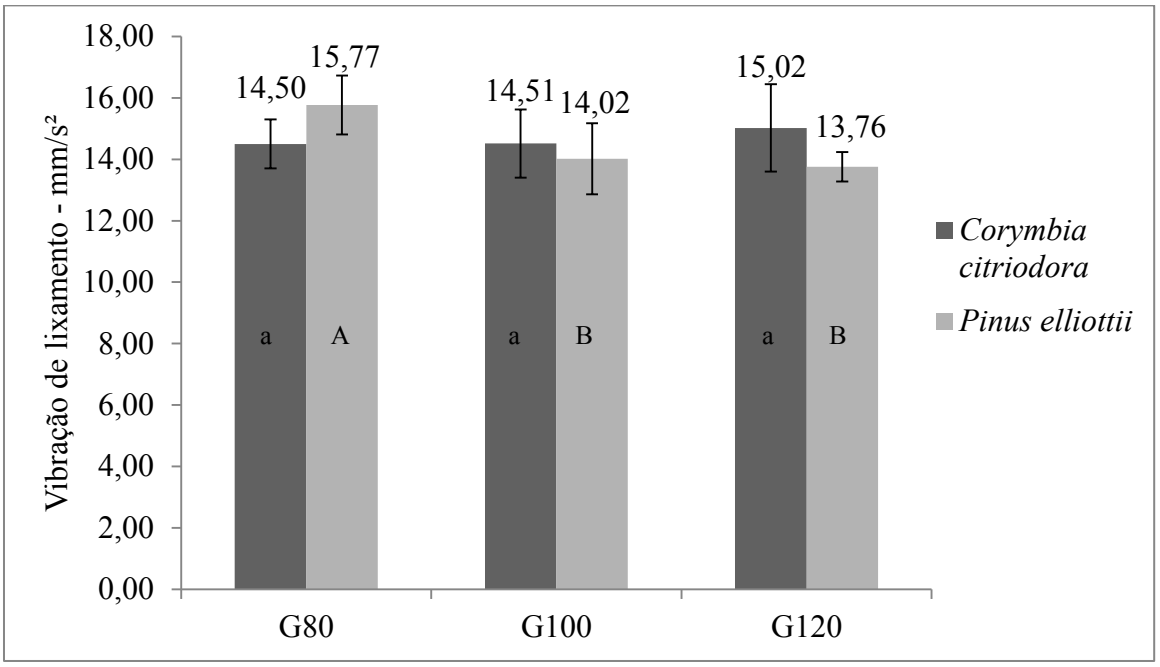
Nota-se que nos valores obtidos com o lixamento da *Corymbia citriodora* há uma leve tendência dos valores de emissão aumentarem de acordo com o aumento da granulometria, porém a variação entre as condições ensaiadas é praticamente nula. Já no *Pinus elliottii* não há essa tendência sendo o seu menor valor médio obtido com a lixa de granulometria de 100 *mesh* e seu maior valor com a granulometria de 80 *mesh*.

Essa diferença de valores e tendências entre as espécies é devido a sua estrutura mais complexa. A madeira de *Corymbia citriodora* possui mais elementos estruturais e assim uma estrutura muito mais complexa do que o *Pinus elliottii*. Nota-se que para as lixas 80 e 120 os maiores valores de emissão acústica foram obtidos com o *Pinus elliottii*.

5.2.2.3.Vibração

Na Figura 40 são apresentados os valores de vibração obtidos durante o processo de lixamento com os grãos de carbeto de silício, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Figura 40 - Variação da vibração no lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de carbeto de silício.



Avaliando estatisticamente os valores da vibração obtidos com a lixa de carbeto de silício nota-se que para a *Corymbia citriodora* os resultados são similares independentemente da variação de granulometria. Já quando foi lixada o *Pinus elliottii* a granulometria de 80 *mesh* se diferencia estatisticamente dos outros dois ensaios, porém não há variação significativa entre as lixas de granulometria 100 e 120 *mesh*. Também é possível notar uma tendência de diminuição da vibração para o *Pinus elliottii* com o aumento da granulometria. Isto é explicado pela diminuição da agressividade do grão abrasivo e pela diminuição da área de contato entre a interface grão e madeira.

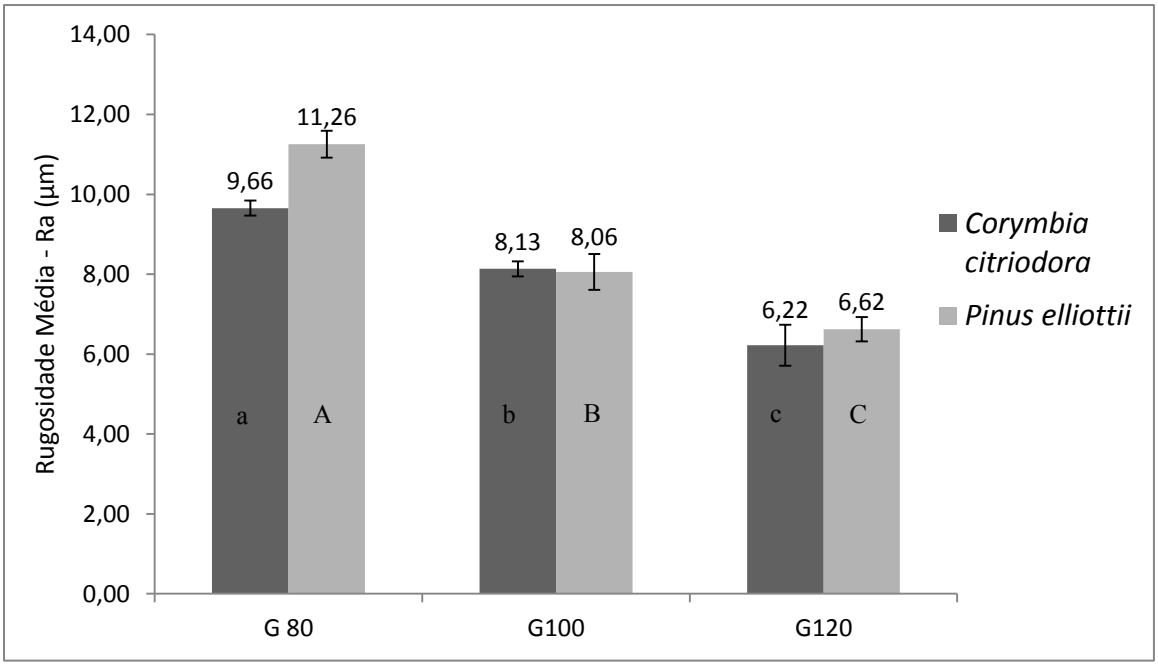
O maior valor médio de vibração foi encontrado para a granulometria de 120 *mesh* na *Corymbia citriodora* e 80 *mesh* quando analisa-se o *Pinus elliottii.* Também nota-se que para

as lixas mais finas os valores obtidos para o *Pinus elliottii* são menores que os valores da *Corymbia citriodora*.

5.2.2.4.Rugosidade

Na Figura 41 são apresentados os valores de rugosidade obtidos durante o processo de lixamento com os grãos de carbeto de silício, bem como a comparação estatística realizada entre os ensaios.

Figura 41 - Variação da rugosidade no lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de carbeto de silício.



Os valores médios de rugosidade obtidos se diferem estatisticamente em todas as granulometrias analisadas para ambas as espécies lixadas. Nota-se que os maiores valores obtidos foram com a lixa de granulometria 80 *mesh* enquanto os menores valores foram com a lixa de 120 *mesh*. Tanto para a *Corymbia citriodora* como para o *Pinus elliottii* percebe-se que há uma tendência de decréscimo da rugosidade com a diminuição do tamanho do grão abrasivo da lixa de carbeto de silício. Também nota-se que na granulometria de 80 *mesh* há uma variação significativa entre os valores de rugosidade entre as espécies lixadas, enquanto que não há essa diferença para as outras granulometrias.

O grão abrasivo de carbeto de silício possui uma superfície mais agressiva e ângulos mais retos o que facilita a sua fratura mantendo assim sempre arestas com o gume cortante afiado, diminuindo assim a rugosidade da peça através do aumento da granulometria da lixa.

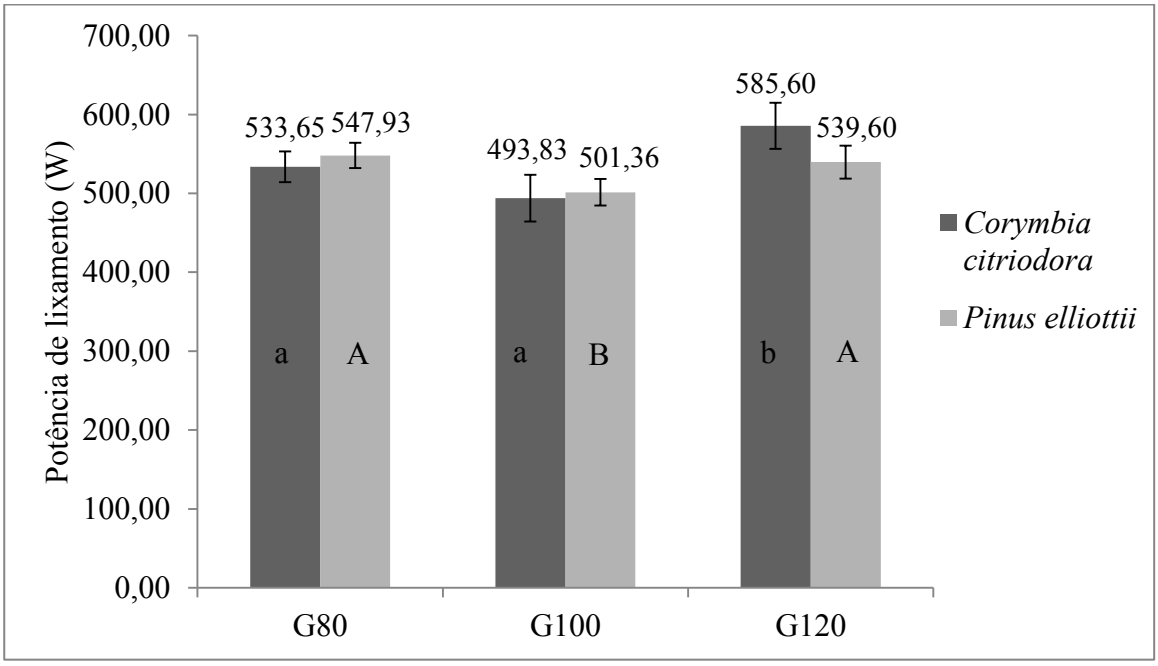
Quando se traça uma comparação entre os valores médios de rugosidade obtidos e as outras variáveis do processo mensuradas pode-se perceber que os menores valores de rugosidade foram obtidos com os menores valores de vibração e potência de lixamento, ou não há diferença estatística entre o menor valor com a granulometria que obteve a menor rugosidade. Quando se compara os valores médios de rugosidades com os valores de emissão acústica também se percebe que as menores rugosidades foram obtidas com os maiores valores, isso ocorre devido ao material gerar mais ondas durante o processo de usinagem.

5.2.3. Óxido de Zircônio

5.2.3.1. Potência de lixamento

Na Figura 42 são apresentadas as variações dos valores de potência de lixamento devido à variação da granulometria na lixa com grãos abrasivos de óxido de zircônio, bem como a análise estatística utilizada.

Figura 42 - Variação da potência de lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de zircônio.



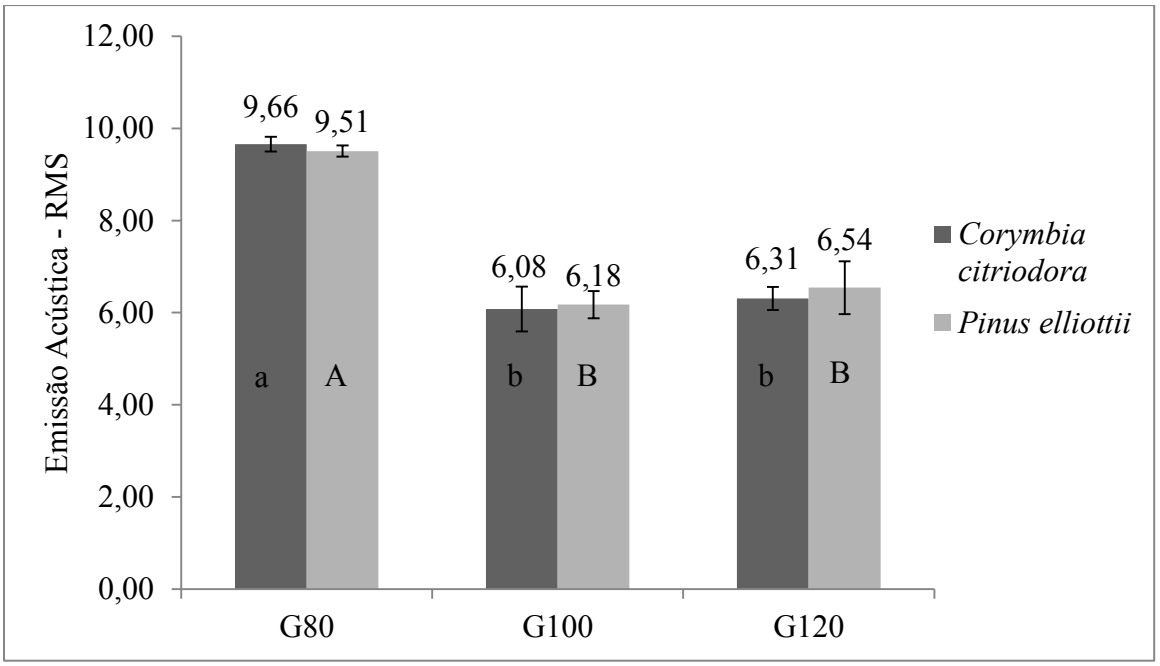
Os valores obtidos de potência de lixamento para a lixa de óxido de zircônio se diferem estatisticamente quando comparamos a lixa com granulometria de 120 *mesh* com as demais, na *Corymbia citriodora*, e a única lixa que se difere das outras granulometrias estatisticamente, no *Pinus elliottii*, é a lixa de granulometria 100 *mesh*.

Nota-se que para os ensaios com o grão abrasivo óxido de zircônio os valores de potência sofrem um decréscimo de seus valores entre os ensaios da lixa 80 e 100 e sobem nos ensaios realizados com a lixa 120, para ambas as espécies.

5.2.3.2.Emissão Acústica

Na Figura 43 são apresentadas as variações dos valores de potência de lixamento devido à variação da granulometria na lixa com grãos abrasivos de óxido de zircônio, bem como a análise estatística utilizada.

Figura 43 - Variação da emissão acústica no lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de zircônio.



Analisando os valores obtidos de emissão acústica pode-se observar que para ambas as espécies ensaiadas apenas a lixa de granulometria de 80 *mesh* se diferencia estatisticamente

das demais lixas. Mais uma vez vale ressaltar que as lixas 100 e 120 são lixas muito próximas quando comparamos o tamanho do grão.

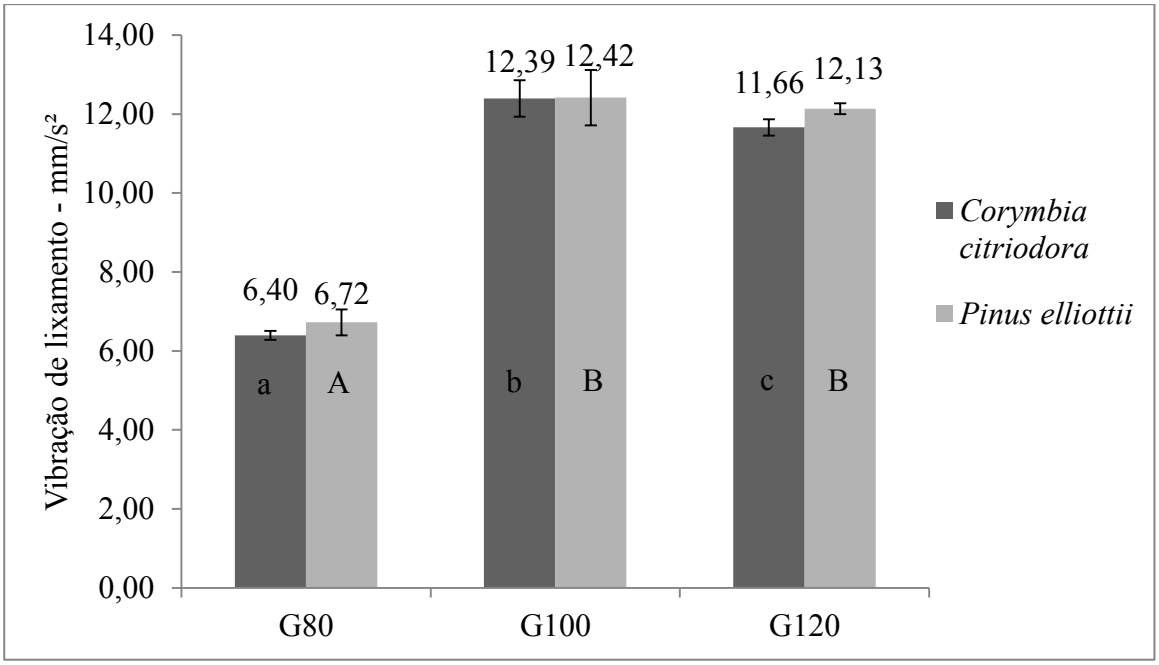
A emissão acústica está diretamente relacionada com a quantidade de material removido da superfície no processo de lixamento. Como o grão abrasivo de 80 *mesh* é maior dentre as outras lixas consequentemente é o que possui uma maior superfície de contato na interface ferramenta/peça, gerando maiores valores de emissão acústica.

A lixa que obteve os menores valores de emissão acústica foi a granulometria de 100 *mesh* e a que obteve os maiores valores foi a lixa de 80 *mesh*, para ambas as espécies.

5.2.3.3.Vibração

Na Figura 44 é mostrada a variação dos valores de vibração de lixamento devido à variação da granulometria na lixa com grãos abrasivos de óxido de zircônio, bem como a análise estatística utilizada.

Figura 44 - Variação da vibração no lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de zircônio.



Os valores de vibração obtidos nos mostram que para a *Corymbia citriodora* todos os valores se diferem estatisticamente, apesar de que as lixas com granulometrias de 100 e 120

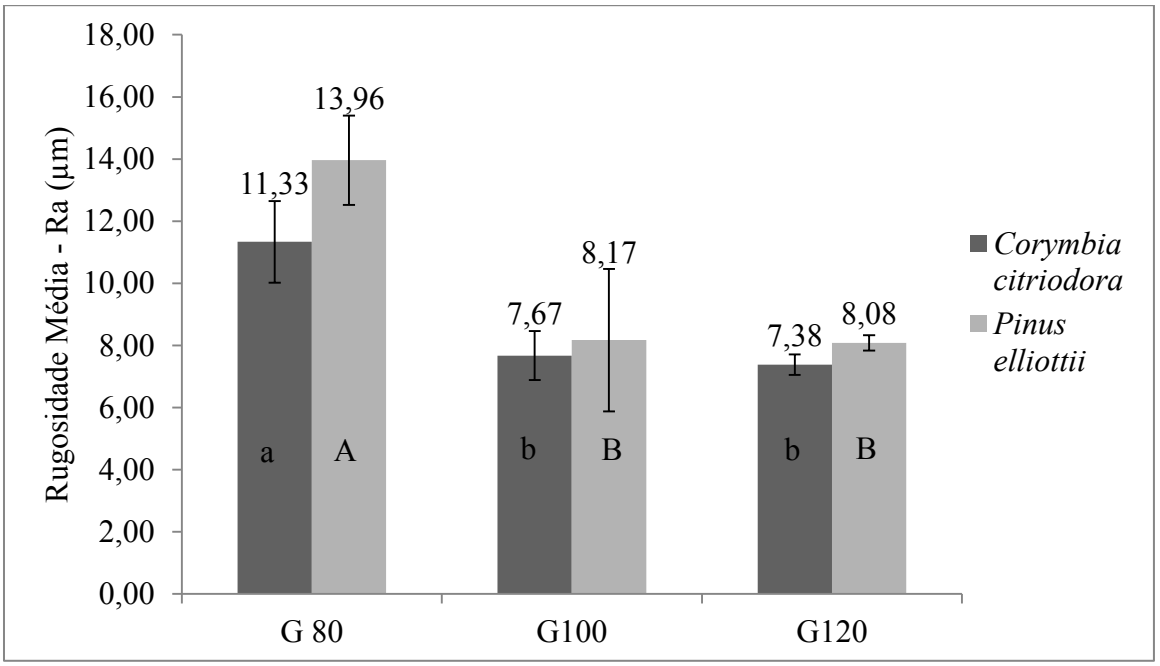
mesh possuem valores muito próximos. Ao analisarmos os valores do *Pinus elliottii* observa-se que a única lixa que difere estatisticamente das demais é a com granulometria de 80 *mesh*.

Para ambas as espécies a lixa 100 obteve os maiores valores vibração enquanto a lixa 80 obteve os menores valores. A propriedade da vibração também está relacionada com a quantidade de material removido da superfície e também com a capacidade de remoção desse material. Quando se lixa a superfície da madeira com grãos abrasivos mais finos esses são incapazes de remover uma depressão maior na superfície, por sua vez essa depressão pode fazer com que o grão abrasivo menor não consiga atingir o seu final fazendo com que uma parte do grão abrasivo não entre em contato com a superfície do material. Esse fato faz com que nas primeiras passadas do grão abrasivo sobre essa depressão aconteça uma queda abrupta e uma colisão lateral com a parede da imperfeição fazendo com que os valores de vibração aumentem.

5.2.3.4.Rugosidade

Na Figura 45 é apresentada a variação dos valores de rugosidade de lixamento devido a variação da granulometria na lixa com grãos abrasivos de óxido de zircônio, bem como a análise estatística utilizada.

Figura 45 - Variação da rugosidade no lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com a granulometria da lixa de óxido de zircônio.



Observando os valores médios de rugosidade apresentados nota-se que apenas a lixa de granulometria 80 *mesh* se diferencia estatisticamente das demais para ambas as espécies, e que os valores da lixa 100 e 120 *mesh* são próximos.

Nota-se que para todos os ensaios, quando comparamos a mesma granulometria, a *Corymbia citriodora* apresenta menores valores de rugosidade média (Ra) do que o *Pinus elliottii*. Esse valor possui uma grande diferença para a lixa de granulometria 80 *mesh*, o *Pinus elliottii* possui uma rugosidade aproximadamente 19% maior que a da *Corymbia citriodora,* enquanto que para as outras granulometrias essa diferença cai drasticamente. Enquanto que para o *Pinus elliottii* a rugosidade é cerca de 6% maior com a granulometria de 100 *mesh* e 8,5% maior na granulometria de 120 *mesh* quando comparadas com a lixa de granulometria de 80 *mesh*.

Essa grande diferença obtida entre as espécies na lixa 80 é devido a anatomia das duas espécies. A *Corymbia citriodora* possui uma maior densidade consequentemente menos espaços vazios no corpo de prova quando comparadas com o *Pinus elliottii;* com isso um grão abrasivo maior, 80 *mesh*, consegue remover mais material sem que ressalte mais imperfeições internas, o que acontece com maior frequência no *Pinus elliottii* fazendo com que o processo de lixamento gere um valor menor de rugosidade.

Quando se analisam as lixas de granulometria 100 e 120 *mesh*, percebe-se que não há uma grande variação entre as espécies e isso se deve ao menor tamanho do grão abrasivo que remove menos material por passada causando consequentemente menos dano à superfície lixada. Esse decréscimo do valor da rugosidade é devido a granulometria do material, que é capaz de retirar grandes imperfeições deixando a superfície mais plana.

Os menores valores foram obtidos com a lixa de 100 *mesh*, porém, esses são estatisticamente iguais aos da lixa de 120 *mesh*, e os maiores valores foram obtidos com a lixa de 80 *mesh*. Isto evidencia uma tendência em aumentar a qualidade superficial do material com o uso de lixas mais finas além da importância de não utilizar grãos com uma granulometria muito próxima.

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÃOS ABRASIVOS VARIANDO A GRANULOMETRIA

Analisando a potência de lixamento nota-se que os maiores valores de potência foram obtidos com o grão abrasivo de óxido de alumínio para todas as configurações possíveis. Os

maiores valores de potência de lixamento para a granulometria de 80 *mesh* para a *Corymbia citriodora* e o *Pinus elliottii* são, respectivamente, 671,91 e 636,38 watts. Quando comparados com o menor valor, na lixa de óxido de zircônio 533,65 W para a *Corymbia citriodora* e 547,93 W *Pinus elliottii*, nota-se que a diferença desses valores é de aproximadamente 20% menor para a *Corymbia citriodora* e de 14% menor para o *Pinus elliottii* quando comparamos os grãos abrasivos.

Nota-se que na maioria dos casos a variação da granulometria não foi suficiente para se obter valores estatisticamente diferentes no processo de lixamento; a lixa que mais se destacou das outras quando avaliada a potência de lixamento foi a lixa de granulometria de 80 *mesh*, e quando comparadas pelo teste de Tukey as lixas de 100 e 120 *mesh* na maioria das vezes possuem um valor similar de potência de corte.

Em relação à potência de lixamento, Varasquim *et al.* (2012) encontraram maiores valores de potência de lixamento para a lixa de 80 mesh utilizando grãos de óxido de alumínio. Em sua dissertação de mestrado, Santiago (2011) observou que a potência de lixamento não foi afetada de forma significativa pela granulometria do material utilizado. Varanda *et al.* (2010) notaram que para o lixamento tubular, utilizando grãos abrasivos de óxido de alumínio, o valor da potência de lixamento decai conforme a granulometria aumenta.

Quando se analisa a emissão acústica e a vibração obtidas no lixamento com os três tipos de abrasivos também se percebe que há pouca variação estatística entre as granulometrias quando avaliamos e tratamos os valores obtidos. Nota-se que para os grãos de óxido de alumínio e carbeto de silício os valores de emissão acústica e vibração possuem valores bem próximos entre as três granulometrias; já a lixa com grãos abrasivos de óxido de zircônio os valores de emissão acústica caem quando se compara a lixa de 80 *mesh* com as demais e a vibração sofre um efeito inverso quando comparada a lixa de 80 *mesh* com as demais.

Os maiores valores de emissão acústica para a lixa de granulometria 80 *mesh* foi obtido com os grãos abrasivos de óxido de zircônio e para as demais granulometrias, 100 e 120 *mesh*, os maiores valores foram obtidos com os grãos abrasivos de óxido de alumínio. Já os menores valores foram encontrados com os grãos abrasivos de carbeto de silício para todas as granulometrias e ambas as espécies estudadas.

Já para a vibração os maiores valores encontrados foram para o carbeto de silício para todas as granulometrias e as duas espécies estudadas e os menores valores foram obtidos com os grãos abrasivos de óxido de zircônio para a granulometria de 80 *mesh*, enquanto os valores

para as granulometrias de 100 e 120 *mesh* foram obtidos com os grãos abrasivos de óxido de alumínio.

Varanda *et al* (2010) também obtiveram um decréscimo da vibração com o aumento da granulometria do conjunto de lixas utilizados no lixamento tubular. Já Santiago (2011), em sua dissertação, percebeu que a emissão acústica só sofreu influência significativa da granulometria, enquanto que os valores pouco se diferenciaram com a variação de velocidade de lixamento e com a variação da pressão de lixamento.

Quando se analisa as variáveis aquisitadas de acordo com o grão abrasivo não se pode deixar de traçar uma comparação do valor obtido com o formato do grão abrasivo. Quando falamos de óxido de alumínio é o grão abrasivo com a superfície mais arredondada e é o grão abrasivo estudado mais difícil de fraturar. Com isso ao longo do processo de lixamento o grão abrasivo obtém uma forma arredondada ao invés de gerar novas arestas de corte; já o grão de carbeto de silício é o grão abrasivo que possui as arestas de corte mais planas tendo assim uma maior capacidade de friabilidade se auto fraturando durante o processo e sempre gerando novas arestas. O óxido de zircônio já é um grão de óxido de alumínio tratado com zircônio para melhorar a capacidade do grão se fraturar. Entre os grãos utilizados nesse trabalho seria um grão que possui uma friabilidade superior a do óxido de alumínio e inferior ao do carbeto de silício.

Também se percebe que há uma grande variação no desvio padrão de todas as variáveis analisadas e isso se deve a variação das propriedades da madeira, sendo que essas podem se alterar ao longo da mesma árvore e essa variação pode ser tanto radial quanto longitudinal.

Analisando os resultados da qualidade superficial nota-se que os menores valores de rugosidade média (Ra) em sua maioria foram obtidos com o óxido de alumínio. A única exceção é a melhor qualidade superficial para a granulometria de 120 *mesh*, para ambas as espécies e foi obtida com o carbeto de silício. Já os maiores valores de rugosidade média foram obtidos foram com os grãos abrasivos de óxido de zircônio sendo a única exceção a granulometria de 100 *mesh*, para a *Corymbia citriodora*, que foi obtida com o carbeto de silício.

Varasquim *et al.* (2012) notaram em seu trabalho que os piores valores de rugosidade sempre foram obtidos com a lixa de granulometria 80 *mesh*, enquanto que os melhores acabamentos superficiais foram obtidos com as granulometrias de 100 *mesh* e 120 *mesh*, que por muitas vezes eram similares estatisticamente. Já Zhong *et al.* (2013) notaram que há uma

grande variação nos valores de rugosidade obtidos com a lixa de granulometria de 120 *mesh* lixando diferentes espécies de madeira.

Resultado Zhong, Hiziroglu e Chan (2013) estudaram materiais à base de madeira e madeiras utilizadas na indústria moveleira de Singapura. Ao todo eles compararam MDF, MDP e 11 espécies de madeira (*Q. alba, P. strobus, P. serotina*, *A. rubrum*, *F. alba*, *J. nigra*, *F. orientalis*, *G. bancanus*, *Sapotaceae*, *T. grandis*, *Shorea* ssp., *N. hemii*). Eles avaliaram a sua qualidade superficial através de um rugosímetro e imagens em 3D obtidas em um instrumento de escaneamento de topografia. As madeiras foram lixadas com uma lixa de granulometria de 120 *mesh*. O tipo do grão abrasivo não é mencionado. A melhor superfície obtida foi de *P. strobus* e *F. alba* enquanto os piores resultados foram obtidos com *Shorea* ssp. e painéis de MDP. Os autores também ressaltam que para trabalhos futuros seria interessante traçar o perfil de umidade a fim de relacioná-lo com a qualidade superficial obtida.

5.4.INFLUÊNCIA DO DESGASTE DO GRÃO ABRASIVO

5.4.1. Óxido de Alumínio

5.4.1.1.Potência de lixamento

Nas Figuras 46, 47 e 48 são apresentados os valores referentes à variação dos valores de potência devido ao desgaste do grão abrasivos através de suas granulometrias.

Analisando os valores obtidos com a lixa de granulometria 80 *mesh* com o desgaste do grão abrasivo de óxido de alumínio nota-se que os únicos desgastes que se diferenciaram dos demais ensaios foram o desgaste de 8 minutos para a *Corymbia citriodora* e o desgaste de 4 minutos para o *Pinus elliottii*. As demais configurações de ensaios são estatisticamente similares.

Vale a pena ressaltar que para a *Corymbia citriodora* existe uma leve tendência de aumento da potência de lixamento com o aumento do desgaste do grão abrasivo. Enquanto o *Pinus elliottii* obteve o seu maior valor de potência no com o desgaste do grão de 4 minutos. Vale ressaltar que apesar de toda a caracterização e escolha dos corpos de prova a fim de homogeneizá-los e diminuir a influência das características da madeira é impossível evitar que essas características influenciem o processo de lixamento.

Figura 46 - Variação da potência no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 80 *mesh*.

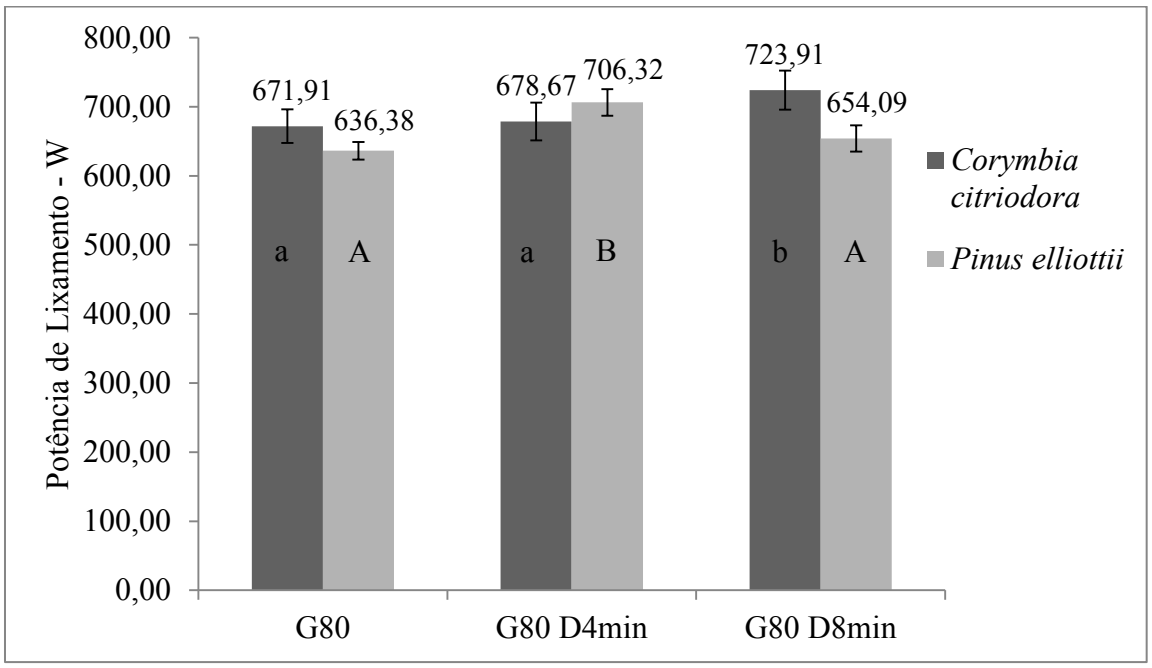
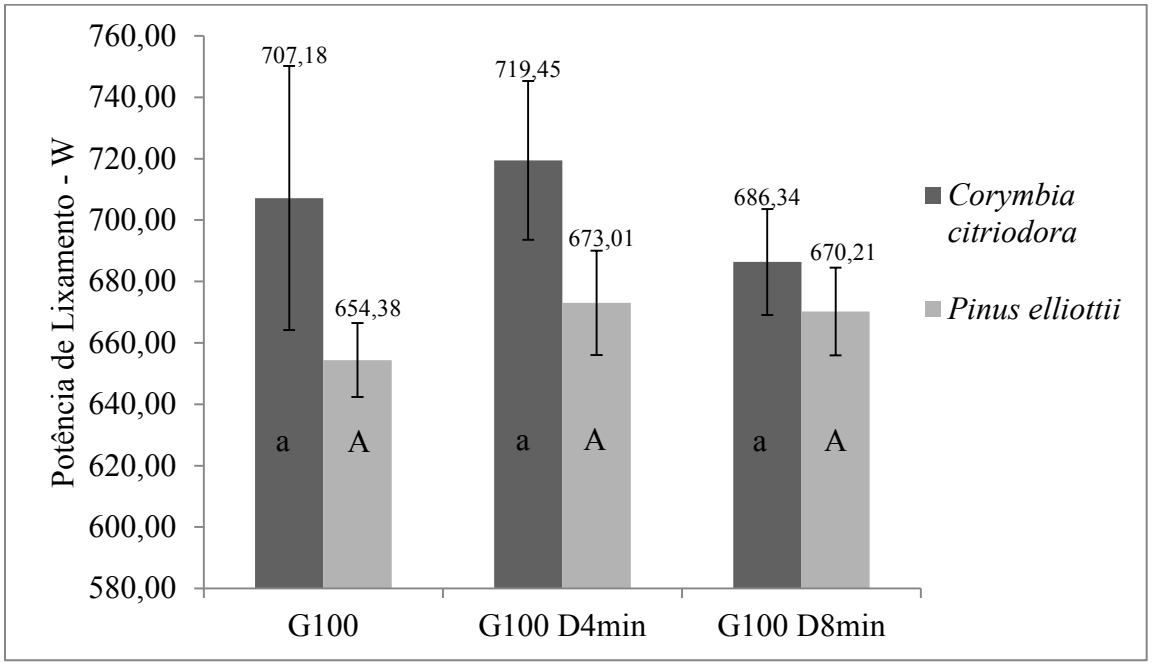


Figura 47 - Variação da potência no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 100 *mesh*.

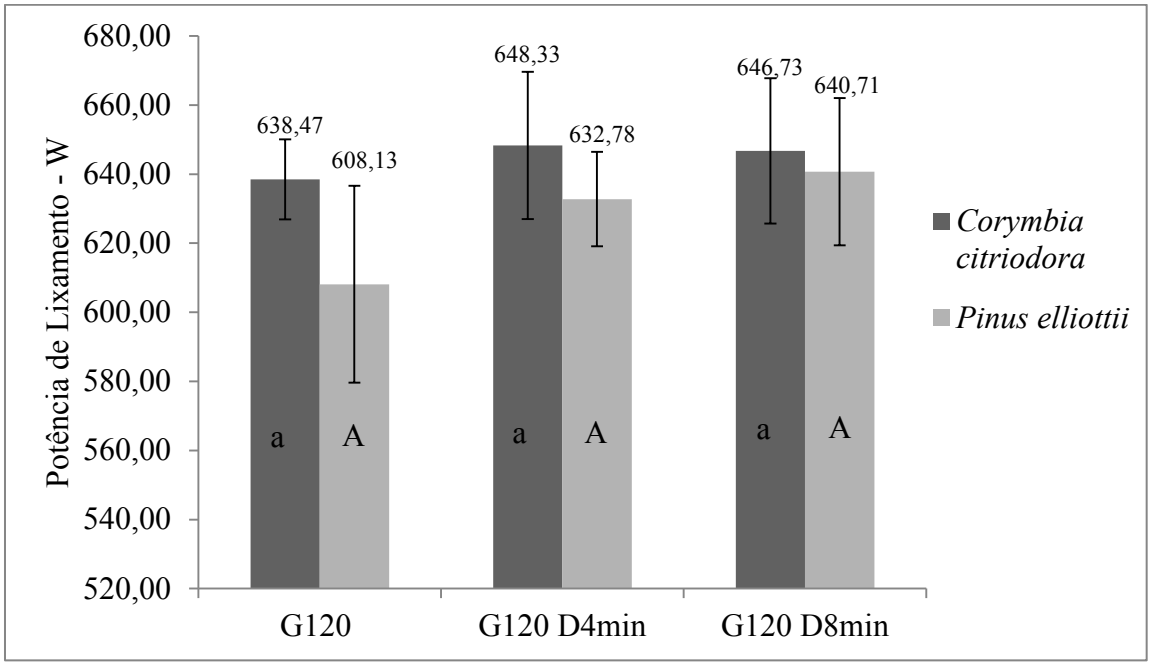


Na análise do desgaste na granulometria de 100 *mesh* nota-se que nenhuma das configurações dos ensaios se diferem estatisticamente. Nota-se também que em todas as

configurações de ensaios a *Corymbia citriodora* obteve maiores valores médios de potência de lixamento quando comparada com o *Pinus elliottii.*

Apesar de os ensaios serem estatisticamente iguais nota-se uma leve tendência do aumento da potência de lixamento no ensaio com desgaste de 4 minutos e um leve decréscimo para o ensaio com 8 minutos de desgaste.

Figura 48 - Variação da potência no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 120 *mesh*.



A granulometria de 100 *mesh* para o óxido de alumínio também não apresentou nenhuma diferença estatística entre os ensaios para ambas as espécies. Também nota-se que todos os valores obtidos no processo de lixamento da *Corymbia citriodora* foram maiores que os valores obtidos com o *Pinus elliottii.*

Nota-se uma tendência do aumento da potência de lixamento com o aumento do degaste para ambas as espécies. Também é possível perceber que quanto maior o desgaste da granulometria de 120 *mesh* no óxido de alumínio mais próximos estão os valores de potência de lixamento entre as espécies.

Comparando o desgaste através das granulometrias a única na qual os desgastes dos grãos abrasivos tiveram alguma influência foi na granulometria de 80 *mesh*, enquanto para as outras duas granulometrias não houve nenhuma influência significativa nos valores de potência de lixamento.

5.4.1.2.Influência do desgaste na emissão acústica

Nas Figuras 49, 50 e 51 são exibidos os valores da variação de emissão acústica devido ao desgaste do grão abrasivo através de suas granulometrias.

Nota-se, analisando os valores de emissão acústica obtidos com a lixa de granulometria 80 sendo desgastada, que os maiores valores foram encontrados quando a lixa sofreu a primeira etapa de desgaste, 4 min, e os menores valores foram obtidos com o máximo desgaste, 8 min, para ambas as espécies.

Avaliando os resultados obtidos com o desgaste da lixa de granulometria de 100 *mesh* nota-se que mais uma vez nenhum ensaio se diferenciou estatisticamente dos demais. Também se nota que para o *Pinus elliottii* o valor da emissão acústica possui uma pequena tendência de diminuir com o aumento do desgaste abrasivo do grão.

Avaliando os valores aquisitados para a granulometria de 120 *mesh* nota-se que nenhuma configuração de ensaio se diferenciou estatisticamente das demais.

Para as granulometrias de 80, 100 e 120 *mesh* não houve nenhuma variação estatisticamente significativa entre os ensaios de desgaste realizados para ambas as espécies.

Figura 49 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 80 *mesh*.

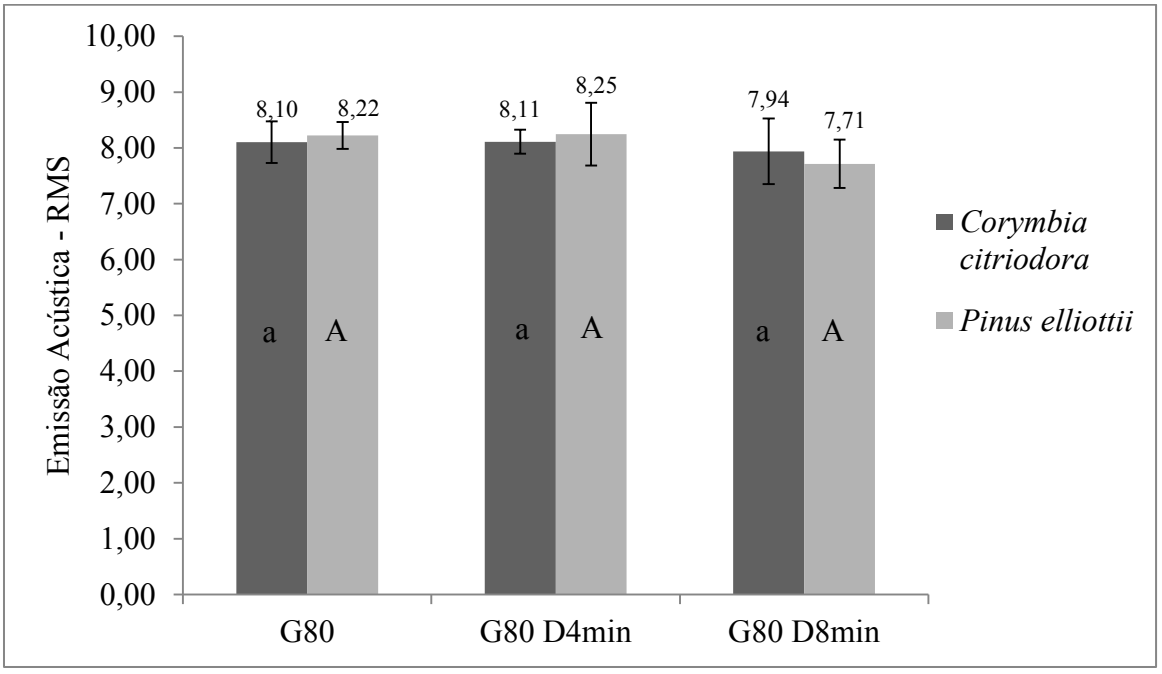


Figura 50 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 100 *mesh*.

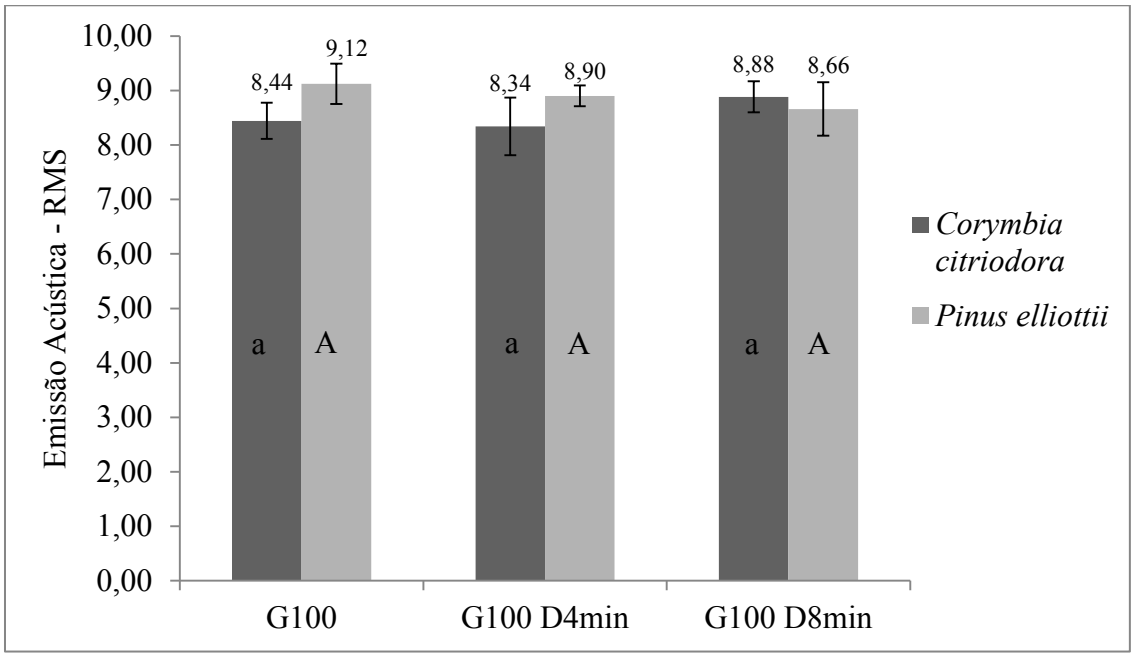
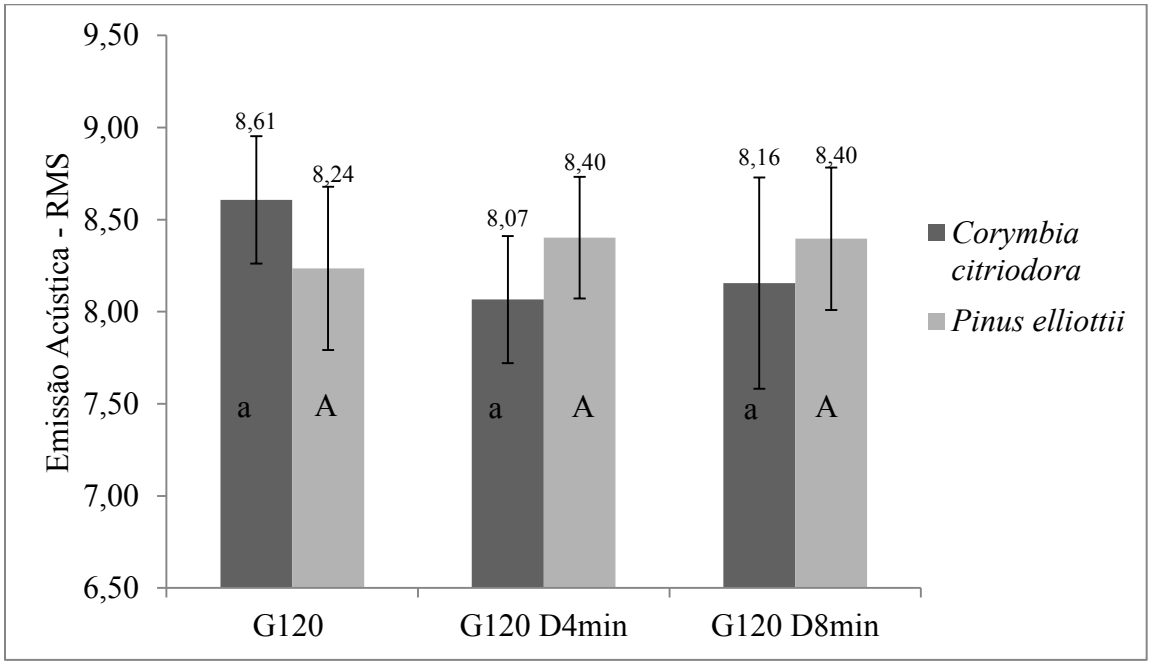


Figura 51 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 120 *mesh*.



Os grãos de óxido de alumínio possuem uma baixa capacidade de se auto fraturarem, friabilidade, e assim gerarem novas arestas de corte. Com isso o perfil do grão abrasivo se

torna mais arredondado fazendo com que ao invés de cortar material esse é compactado. Com isso o material é compactado na superfície ao invés de ser cortado.

5.4.1.3.Influência do desgaste na vibração

Nas Figuras 52, 53 e 54 são expostos os valores que mostram a variação da vibração devido ao desgaste do grão abrasivo de óxido de alumínio através de suas granulometrias.

Avaliando as granulometrias de 80 e 120 *mesh* notou-se que em nenhuma delas o desgaste do grão abrasivo gerou valores estatisticamente diferentes para as configurações dos ensaios realizadas. Observando as lixas com granulometria 80 e 100 *mesh* os valores de vibração sempre foram maiores para os ensaios utilizando a *Corymbia citriodora* quando comparados com o *Pinus elliottii*. Já na lixa com granulometria de 120 *mesh* com o primeiro desgaste realizado, 4 minutos, o valor da vibração obtido do *Pinus elliottii* é maior que o da *Corymbia citriodora*.

Figura 52 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 80 *mesh*.

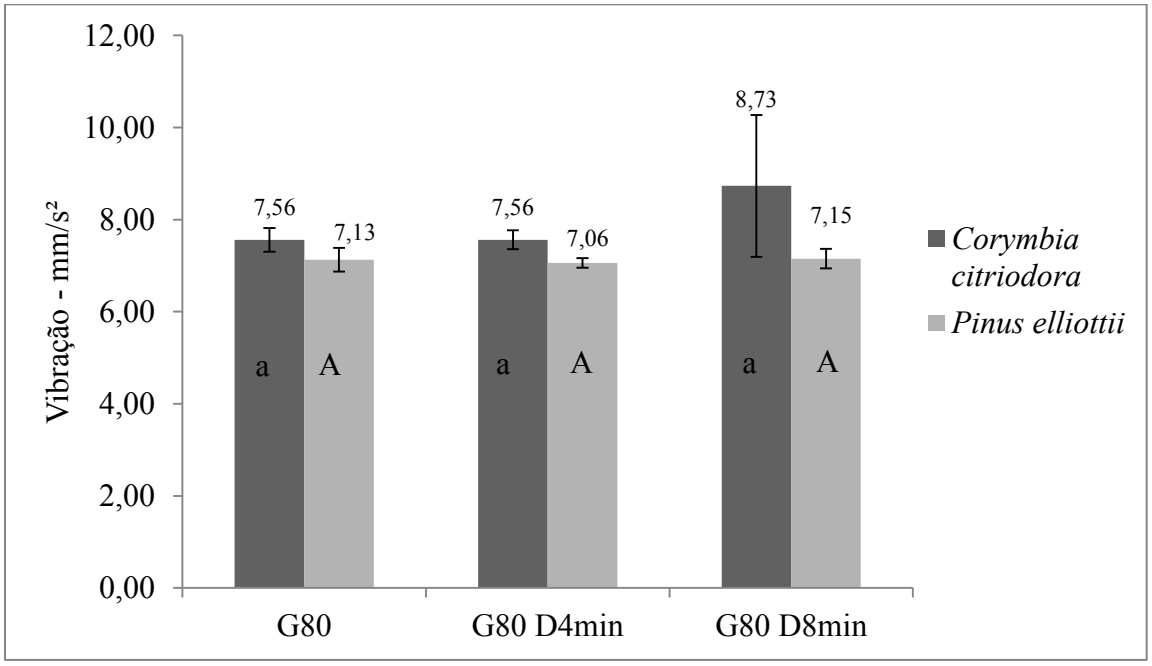


Figura 53 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 100 *mesh*.

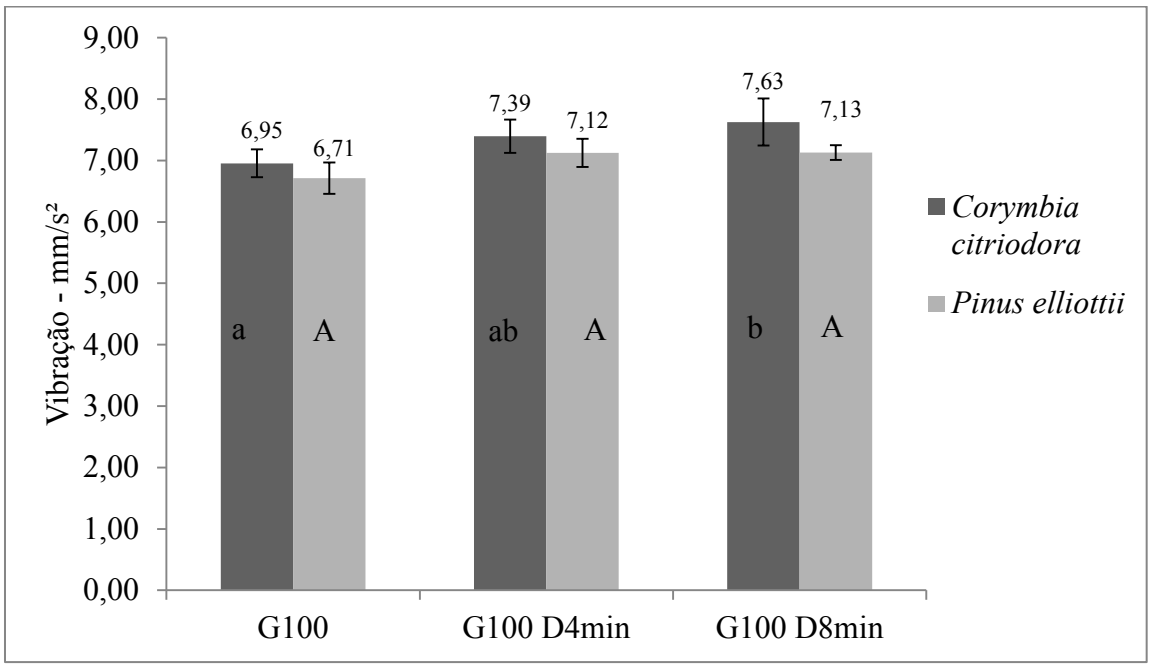
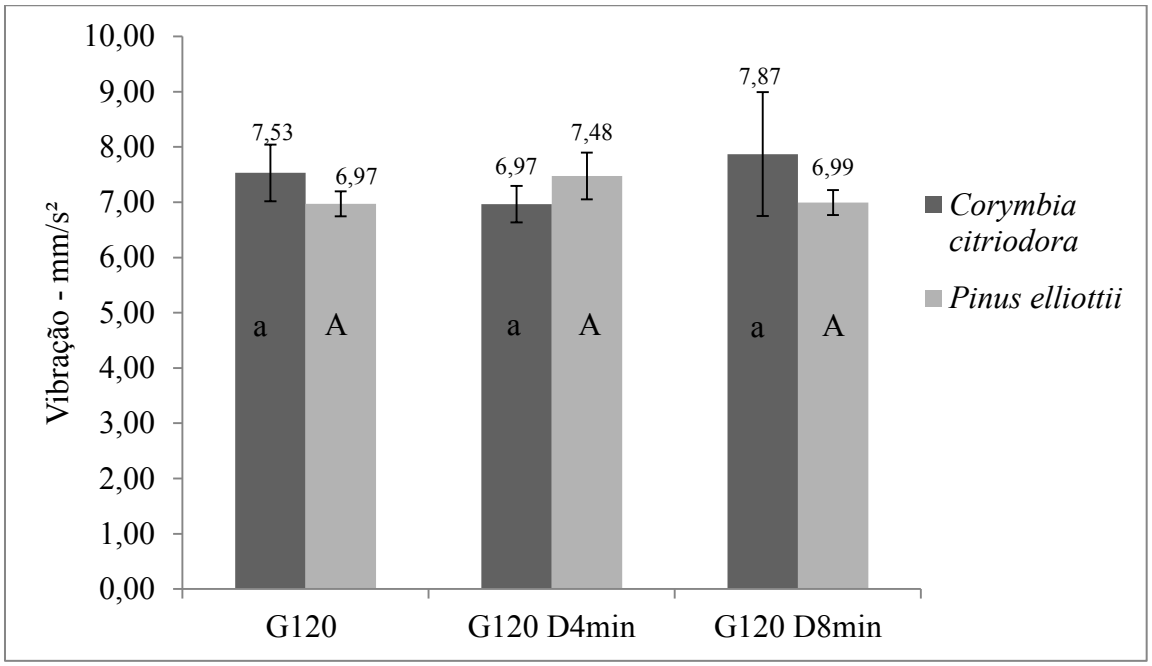


Figura 54 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 120 *mesh*.



Quando analisamos a lixa de granulometria 100 *mesh* o *Pinus elliottii* não obteve diferença estatística entre seus ensaios; já na *Corymbia citriodora* a condição mais severa de

desgaste se diferencia da condição sem nenhum desgaste e se assemelha estatisticamente ao primeiro desgaste realizado.

5.4.1.4.Influência do desgaste na rugosidade

Nas Figuras 55, 56 e 57 são apresentados os valores de rugosidade média obtidos, com o desgaste abrasivo, para as lixas de granulometria 80, 100 e 120 de óxido de alumínio.

Avaliando os resultados gerados pelos ensaios pode-se perceber que em sua maioria a rugosidade não variou estatisticamente quando comparamos os ensaios com o primeiro e segundo desgaste realizado. A única exceção é com a comparação entre o desgaste de 4 e 8 minutos para a *Corymbia citriodora* com a granulometria de 100 *mesh*; nesses ensaios para a essa espécie todos se diferenciaram estatisticamente.

Outro aspecto importante é que em todas as granulometrias para o óxido de alumínio a rugosidade média diminuiu significativamente quando comparado o grão abrasivo sem desgaste com o grão abrasivo com o primeiro nível de desgaste. Essa característica é própria de operações utilizando materiais abrasivos que começam se fraturar durante o processo gerando novas arestas de corte e assim mantendo a qualidade superficial elevada.

Figura 55 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 80 *mesh*.

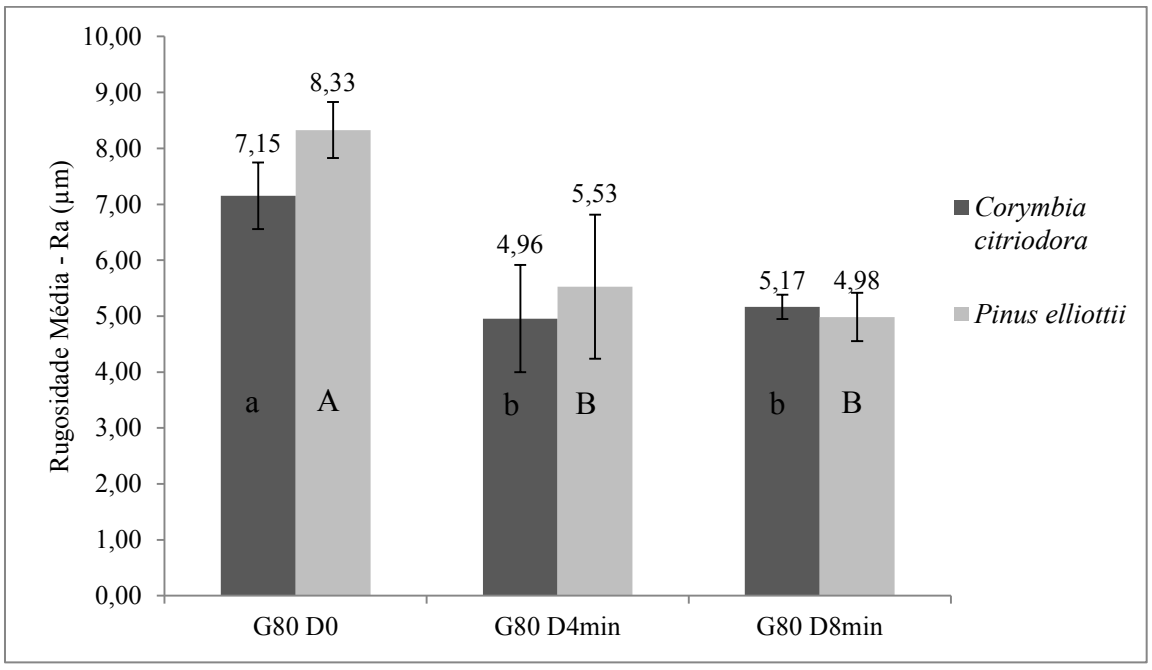


Figura 56 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 100 *mesh*.

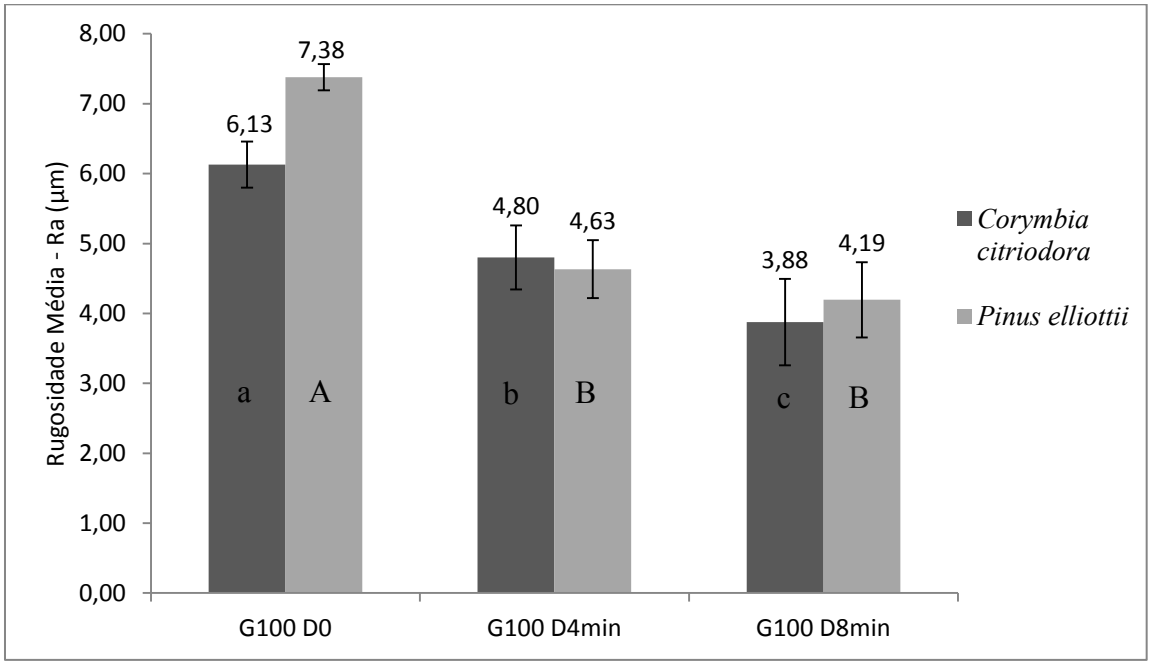
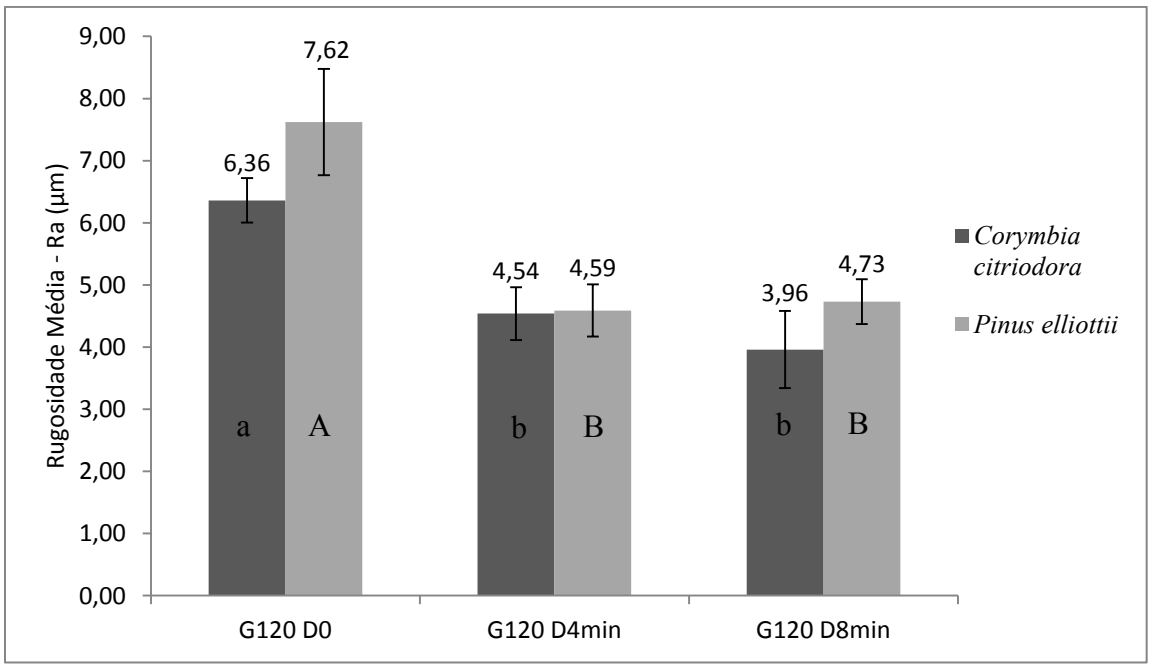


Figura 57 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo de óxido de alumínio para a granulometria de 120 *mesh*.



Nota-se também que quando se compara os valores obtidos de rugosidade média com as granulometrias ensaiadas, os maiores valores encontrados foram para os ensaios realizados com o grão abrasivo de 80 *mesh* e que os valores entre os grãos de 100 e 120 *mesh* são bastante similares.

Levando-se em consideração o desgaste do grão abrasivo, constata-se sua maior influência na variável rugosidade média, o mesmo não podendo ser afirmado para as outras variáveis, sendo que o desgaste do grão abrasivo não influenciou de forma significativa o comportamento das variáveis potência de lixamento, emissão acústica e vibração.

5.4.2. Carbeto de silício

5.4.2.1.Potência de lixamento

Nas Figuras 58, 59 e 60 são apresentados os valores obtidos, com o desgaste abrasivo, para a potência de lixamento para as lixas de granulometria 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de carbeto de silício.

Figura 58 - Variação da potência de lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 80 *mesh*.

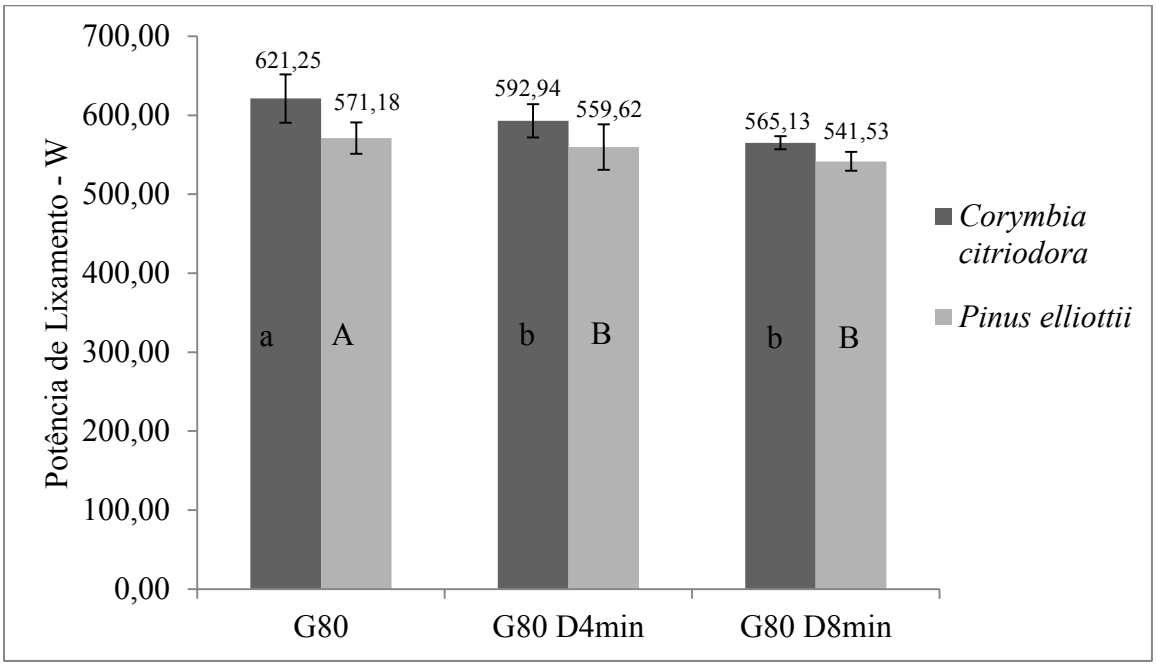


Figura 59 - Variação da potência de lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 100 *mesh*.

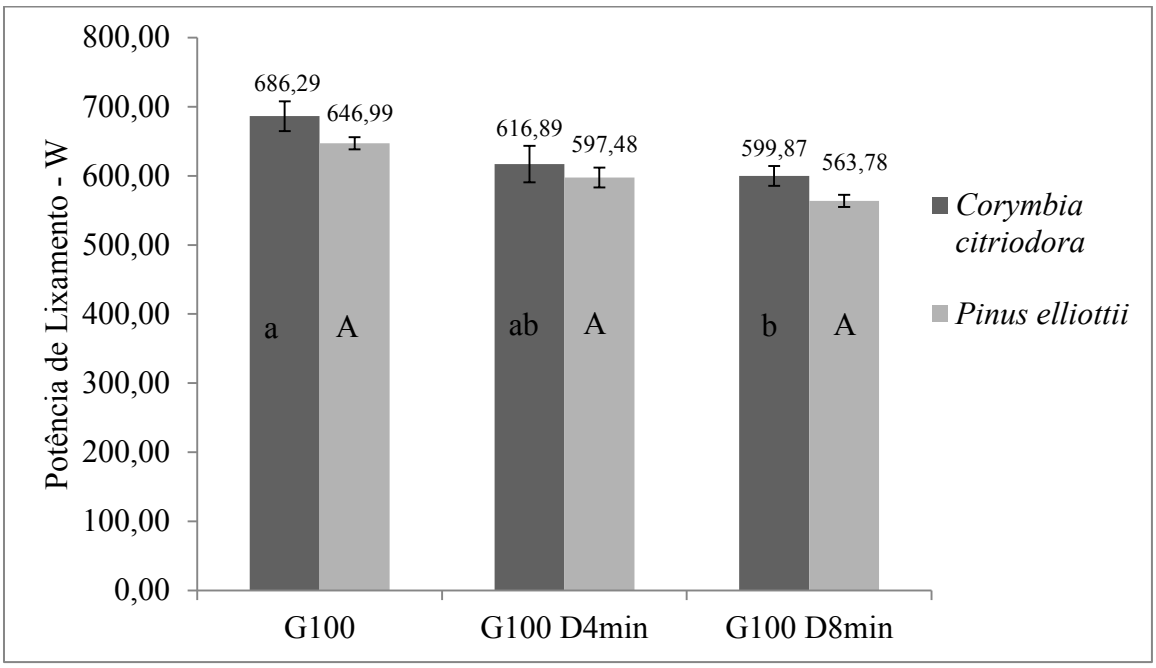
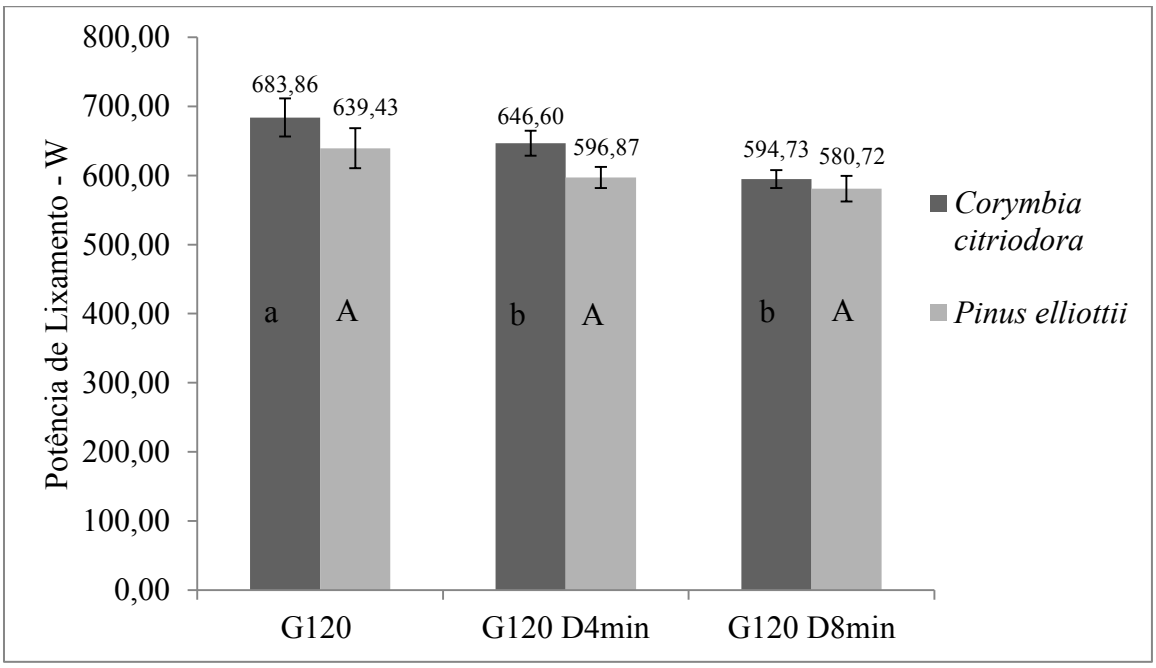


Figura 60 - Variação da potência de lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 120 *mesh*.



Analisando-se os valores obtidos pode-se notar que para todas as configurações de ensaios com o carbeto de silício o valor de potência de lixamento foi maior para a *Corymbia citriodora* quando se variou o desgaste. Nota-se que há uma pequena tendência de decréscimo

da potência de lixamento com o aumento do degaste do grão abrasivo de carbeto de silício para todas as granulometrias ensaiadas.

Nos grãos com granulometria de 80 *mesh* os valores da potência de lixamento com o grão abrasivo sem desgaste se diferenciam estatisticamente dos ensaios dos grãos abrasivos desgastados. Já quando compara-se os ensaios com 4 minutos e 8 minutos de desgaste esses se assemelham estatisticamente, para ambas as espécies avaliadas.

Na lixa com granulometria de 100 *mesh,* observa-se que os ensaios do *Pinus elliottii* são similares estatisticamente, diferentemente do que acontece com os ensaios realizados com a *Corymbia citriodora*, que os valores de potência de lixamento para a granulometria de 100 *mesh* sem desgaste é estatisticamente igual ao valor de potência de lixamento com o desgaste de 4 minutos e se difere estatisticamente do valor obtido com o desgaste de 8 minutos. Já a lixa 100 *mesh* com desgaste de 4 minutos gerou valores que são estatisticamente iguais as outras condições de desgaste.

A granulometria de 120 *mesh* para o *Pinus elliottii* gerou valores que não diferenciam entre si quando estatisticamente comparados pelo teste de Tukey. Considerando-se os valores da *Corymbia citriodora,* o ensaio no qual o grão não sofreu um desgaste abrasivo se diferencia estatisticamente das demais condições que sofreram desgastes, estas se assemelham estatisticamente.

5.4.2.2.Emissão acústica

Nas Figuras 61, 62 e 63 são apresentados os valores obtidos, com a variação do desgaste abrasivo, para a emissão acústica no processo de lixamento para as lixas de granulometria 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de carbeto de silício.

Nota-se que em sua maioria os valores obtidos de emissão acústica foram maiores para o *Pinus elliottii* do que os da *Corymbia citriodora.*

Avaliando os valores obtidos de emissão acústica, nota-se que o desgaste do grão abrasivo de carbeto de silício não influenciou significativamente essa variável de controle, pois não há nenhuma variação estatística através dos ensaios realizados.

Para os valores obtidos com a *Corymbia citriodora* nota-se que para as granulometrias de 80 e 100 mesh quando compara-se uma lixa nova com uma lixa desgastada por 4 minutos percebe-se uma tendência de aumento dos valores de emissão acústica. Esse evento tem a ver com o aumento da superfície de contato entre o grão abrasivo e a peça.

Figura 61 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 80 *mesh*.

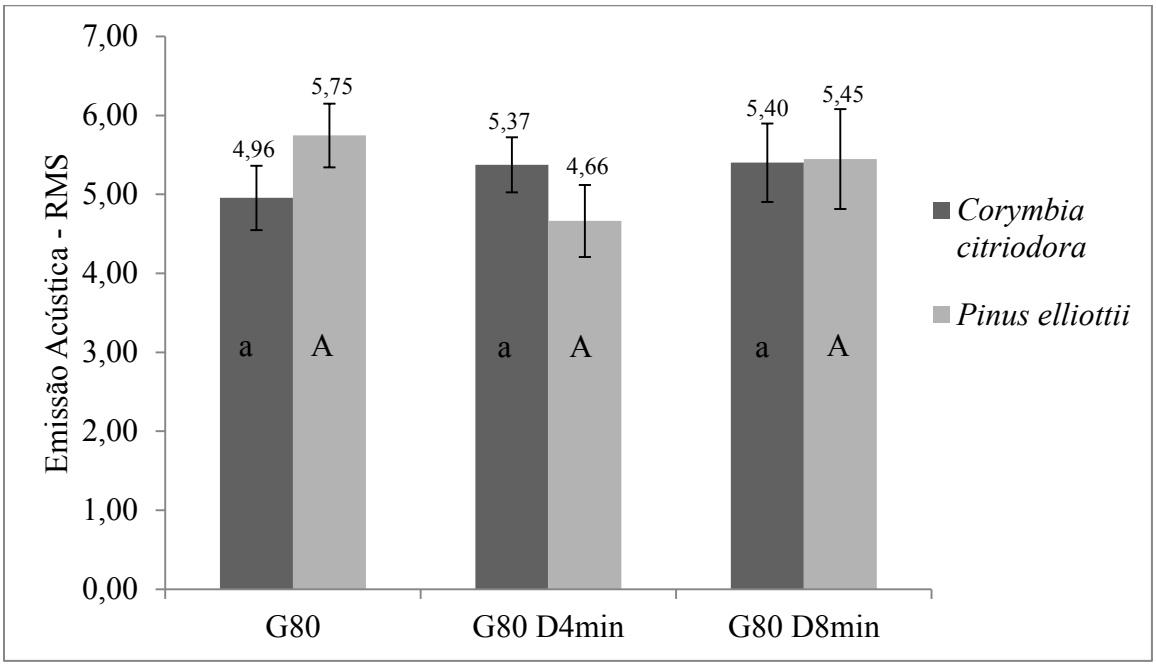


Figura 62 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 100 *mesh*.

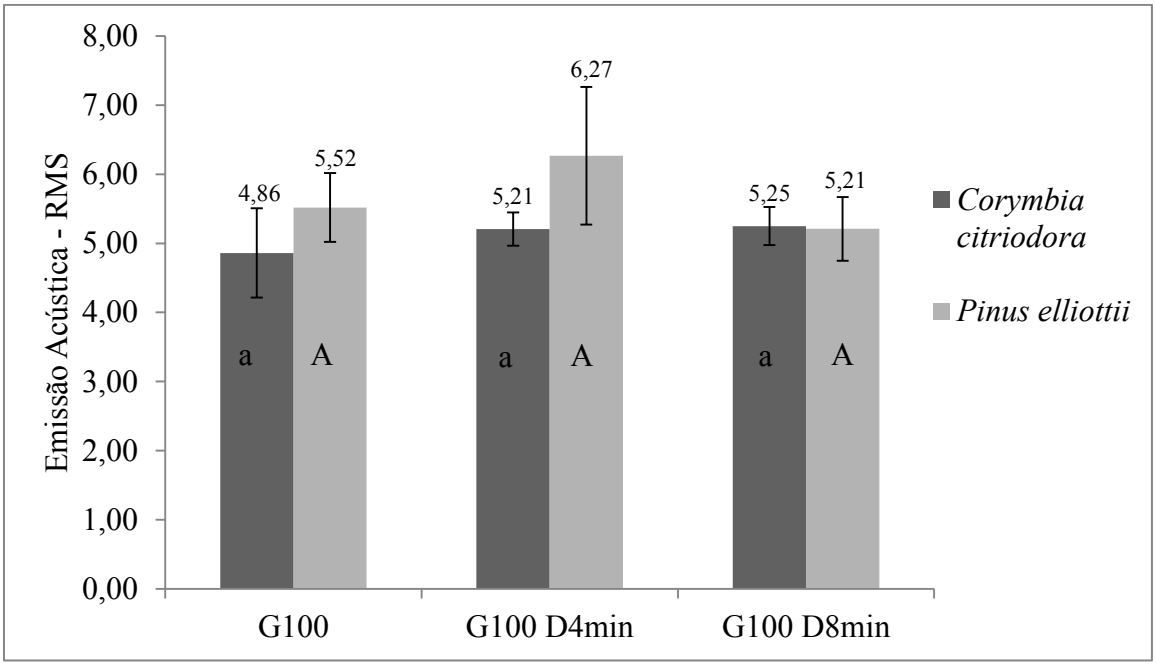
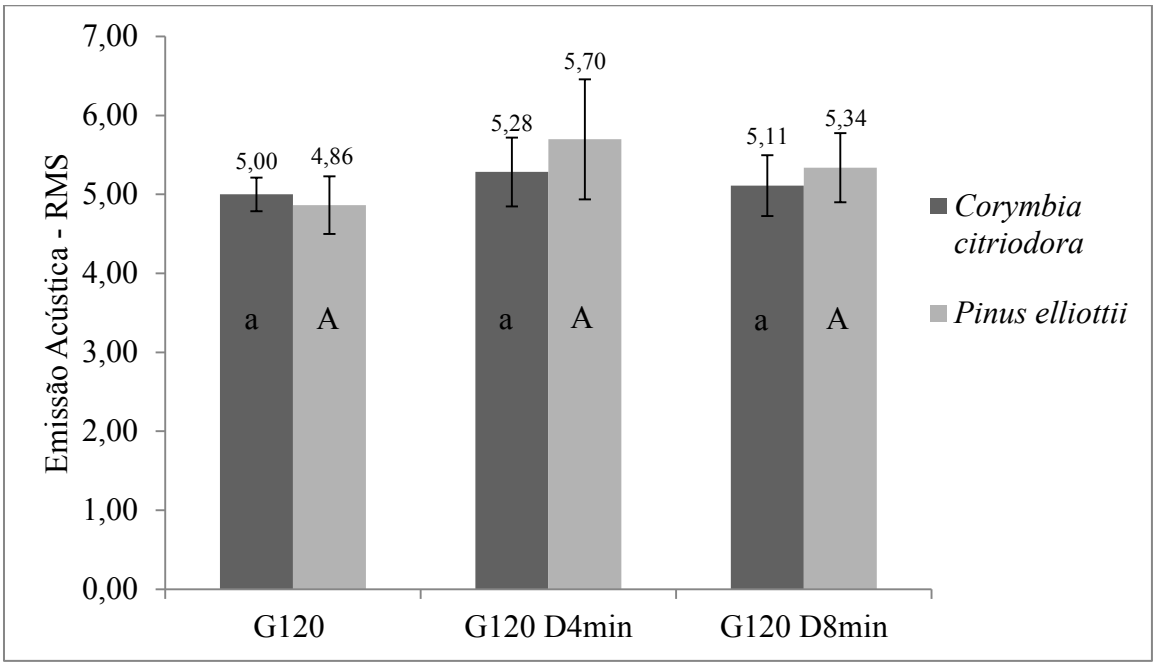


Figura 63 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 120 *mesh*.



Devido a formação de micro trincas no grão abrasivo esse começa a usinar mais o material fazendo com que o sinal de emissão acústica aumente. Nota-se que a maioria dos valores de emissão acústica do *Pinus elliottii* são superiores aos valores obtidos com o *Corymbia citriodora*, isso se deve ao *Pinus elliottii* ser menos denso que a outra espécie fazendo com que o grão consiga penetrar mais profundamente na peça.

5.4.2.3.Vibração

Nas Figuras 64, 65 e 66 são apresentados os valores obtidos, com a variação do desgaste abrasivo, para a vibração no processo de lixamento para as lixas de granulometria 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de carbeto de silício.

Com a análise estatística dos valores de vibração nota-se que todos os grupos ensaiados são semelhantes, para ambas as espécies.

Figura 64 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 80 *mesh*.

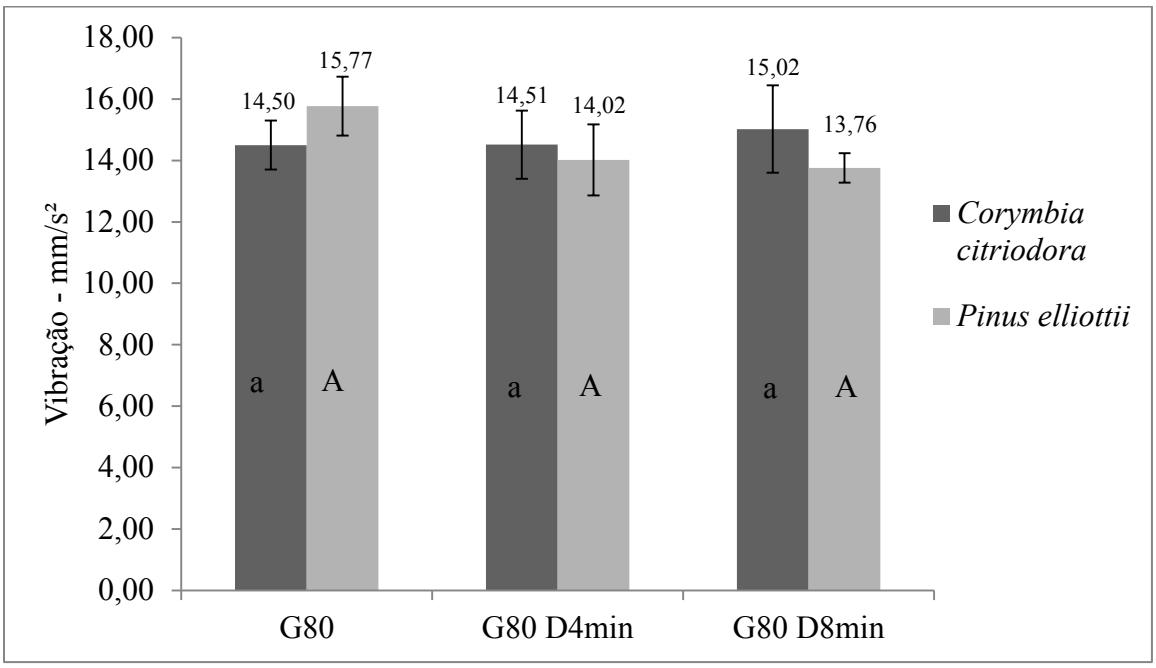


Figura 65 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 100 *mesh*.

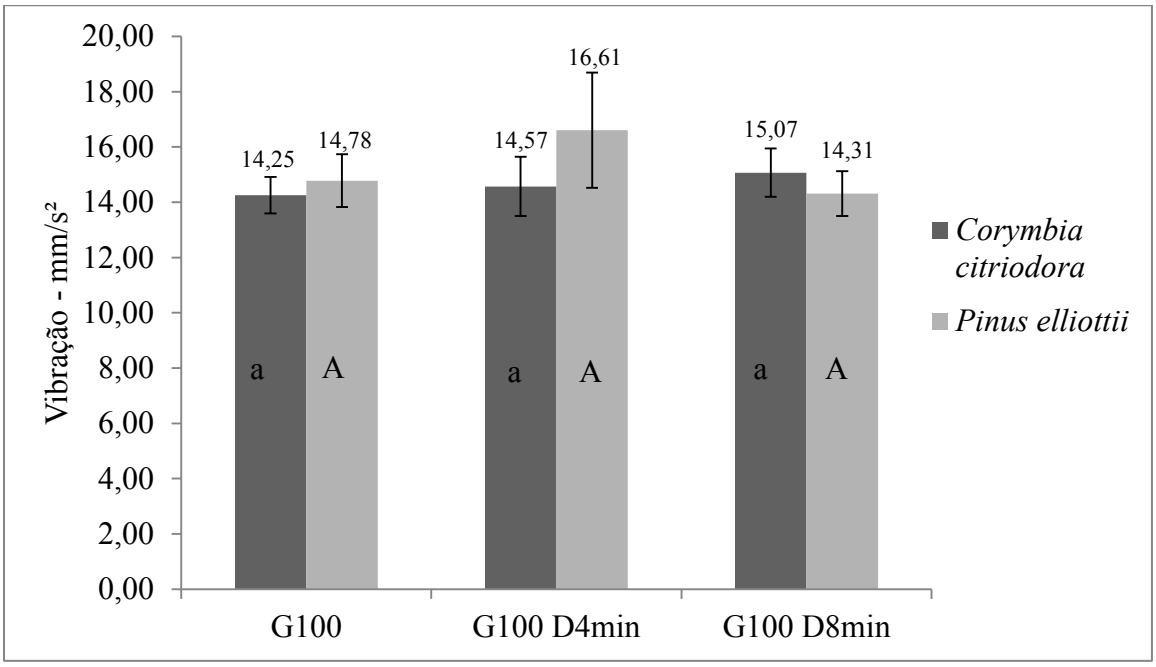
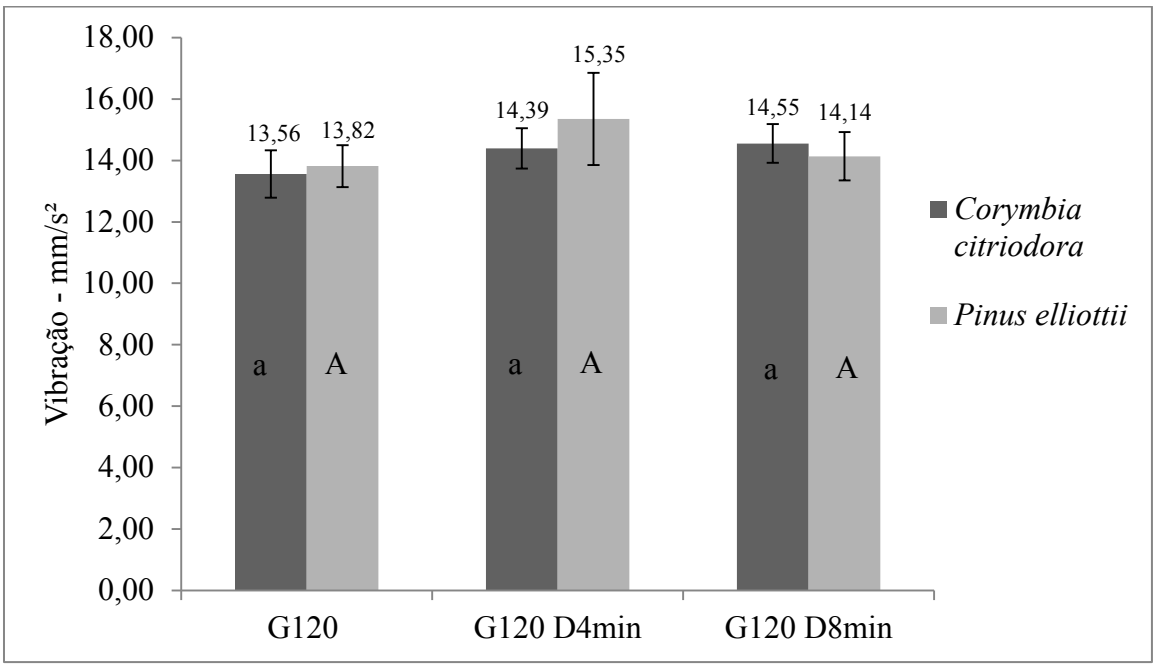


Figura 66 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 120 *mesh*.



Considerando-se os valores obtidos do desgaste dos grãos abrasivos para o carbeto de silício a vibração, quando analisada a *Corymbia citriodora*, teve uma pequena tendência de aumentar com o aumento do desgaste dos grãos abrasivos para todas as granulometrias avaliadas (80, 100 e 120 *mesh*). Já para o *Pinus elliottii* nota-se que há um aumento da vibração entre o ensaio com o grão abrasivo novo, sem desgaste, e com o primeiro desgaste de quatro minutos para as lixas de granulometria 100 e 120 *mesh*, enquanto que para a granulometria de 80 *mesh* os valores de vibração diminuíram após a realização do primeiro desgaste. Quando comparamos o desgaste abrasivo de quatro minutos com o de oito minutos todas as granulometrias sofreram um decréscimo em seu valor.

5.4.2.4.Rugosidade

Nas Figuras 67, 68 e 69 são mostrados os valores obtidos, com a variação do desgaste abrasivo, para a rugosidade média (Ra) no processo de lixamento para as lixas de granulometria 80, 100 e 120 *mesh* com os grãos abrasivos de carbeto de silício.

Figura 67 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 80 *mesh*.

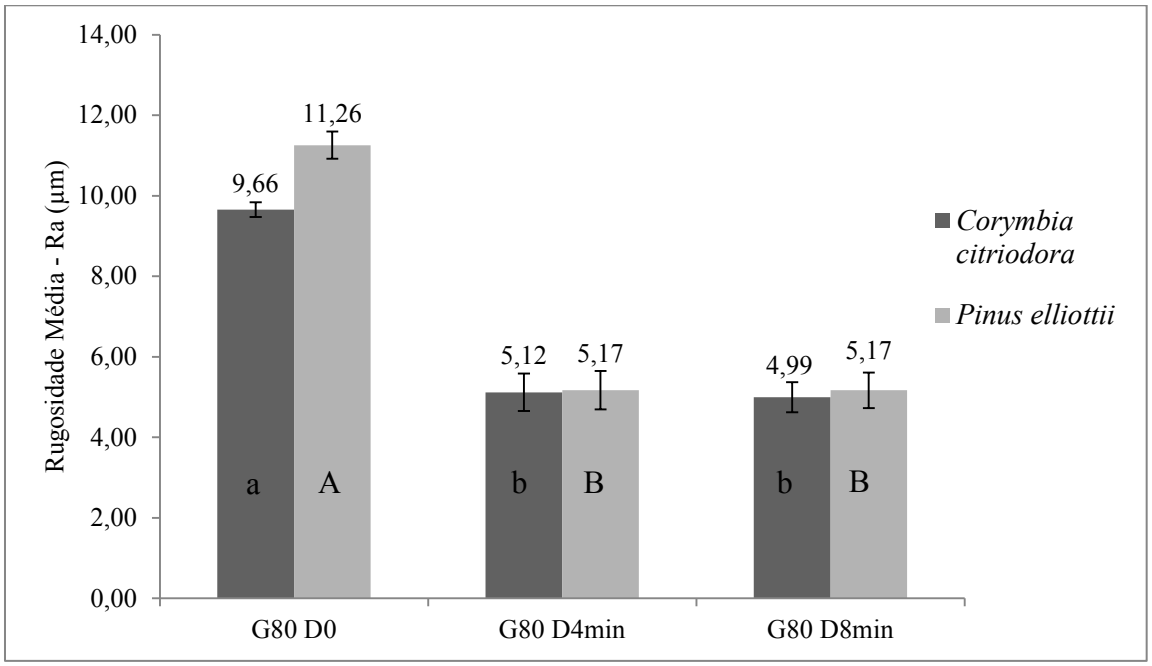


Figura 68 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 100 *mesh*.

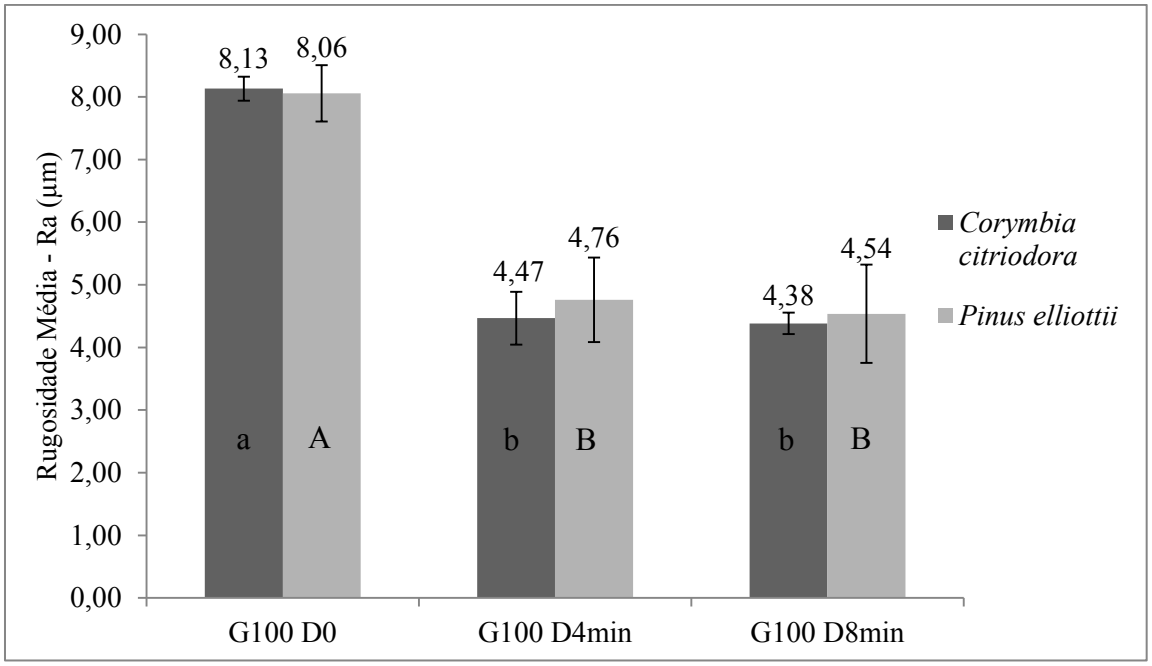
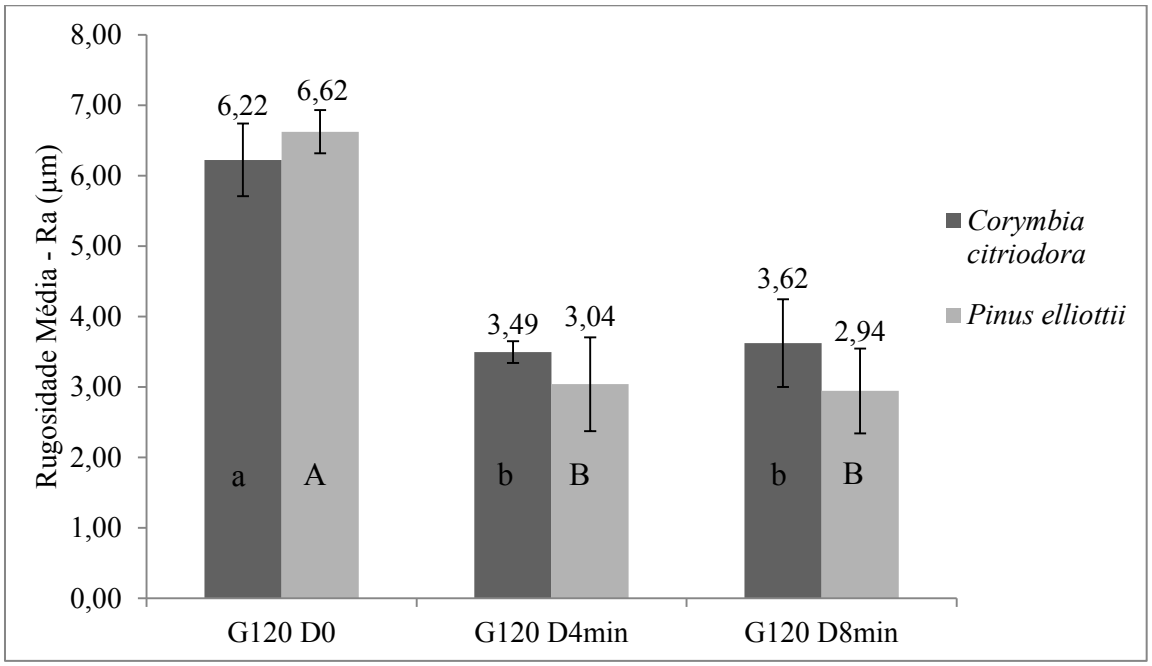


Figura 69 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do carbeto de silício para a granulometria de 120 *mesh*.



Analisando-se os resultados obtidos, nota-se que para todas as granulometrias e espécies a rugosidade média sofre um decréscimo quando comparamos um grão sem desgaste com o grão desgastado por quatro minutos. Quando se faz uma comparação entre o grão abrasivo sem desgaste com o grão abrasivo desgastado por quatro e depois oito minutos nota-se que o valor de rugosidade média para o grão sem desgaste é estatisticamente diferente das outras condições. Quando se compara os valores obtidos com os dois tipos de desgaste nota-se que estes são estatisticamente iguais, para todas as espécies e granulometrias.

Avaliando os valores obtidos da rugosidade média pode-se notar que os maiores valores de rugosidade foram obtidos com a granulometria de 80 *mesh* enquanto os menores foram obtidos com a granulometria 120. Os valores obtidos nas granulometrias 100 e 120 são muito próximos em todas as variações dos ensaios.

Assim como nos grãos de óxido de alumínio, avaliando-se a influência do desgaste do grão abrasivo, nota-se sua maior influência na variável rugosidade média, o mesmo não podendo ser afirmado para as outras variáveis, sendo que o desgaste do grão abrasivo não influenciou de forma significativa o comportamento das variáveis potência de lixamento, emissão acústica e vibração.

5.4.3. Óxido de zircônio

5.4.3.1.Potência de lixamento

Nas Figuras 70, 71 e 72 são apresentados os valores obtidos, com a variação do desgaste abrasivo, para a potência de lixamento para as granulometrias 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de óxido de zircônio.

Ao se analisar os valores de potência de lixamento obtidos nota-se que não há diferença estatística entre os valores quando comparado o desgaste do grão abrasivo de óxido de zircônio com todas as granulometrias ensaiadas para ambas as espécies.

Analisando-se os valores obtidos com a granulometria de 100 *mesh* percebe-se uma pequena tendência da potência aumentar de acordo como desgaste do grão abrasivo tanto para o *Pinus elliottii* como para a *Corymbia citriodora.* Esse comportamento também é observado para o *Pinus elliottii* na granulometria de 120 *mesh* e para a *Corymbia citriodora* na granulometria de 80 *mesh*.

Figura 70 - Variação da potência de lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 80 *mesh*.

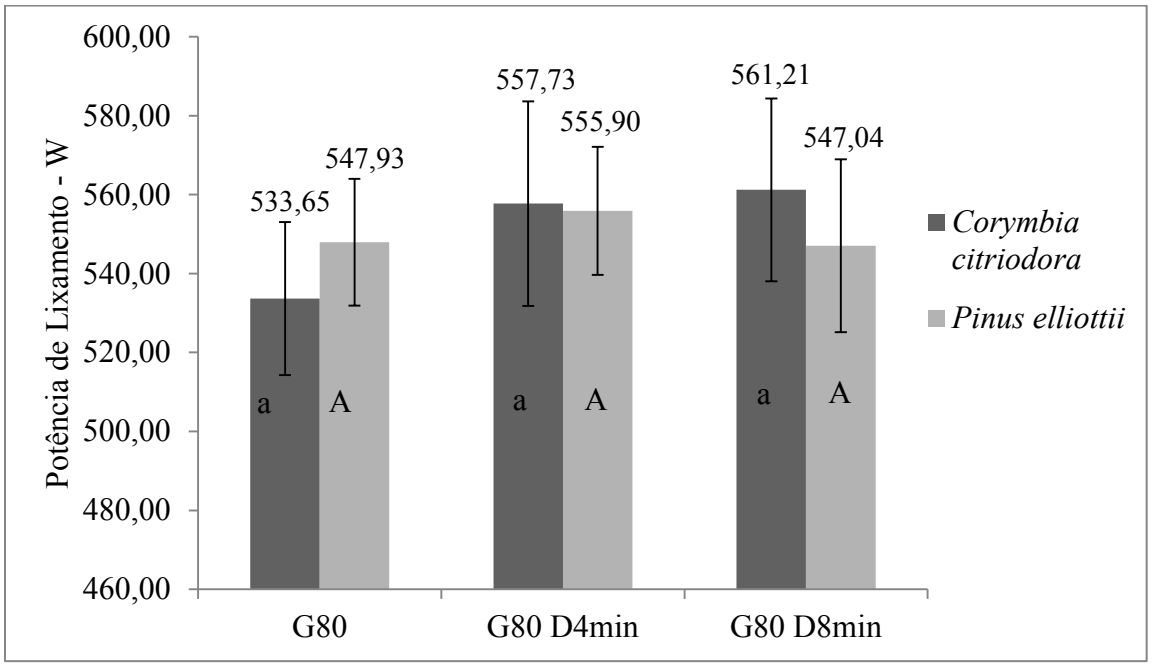


Figura 71 - Variação da potência de lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 100 *mesh*.

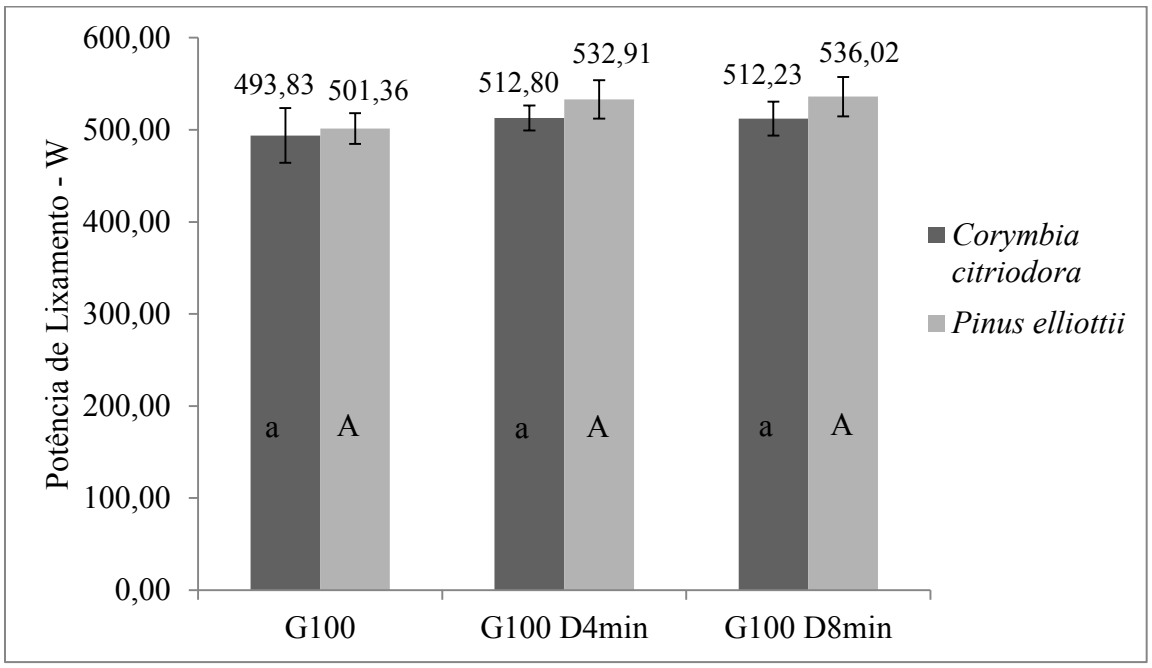
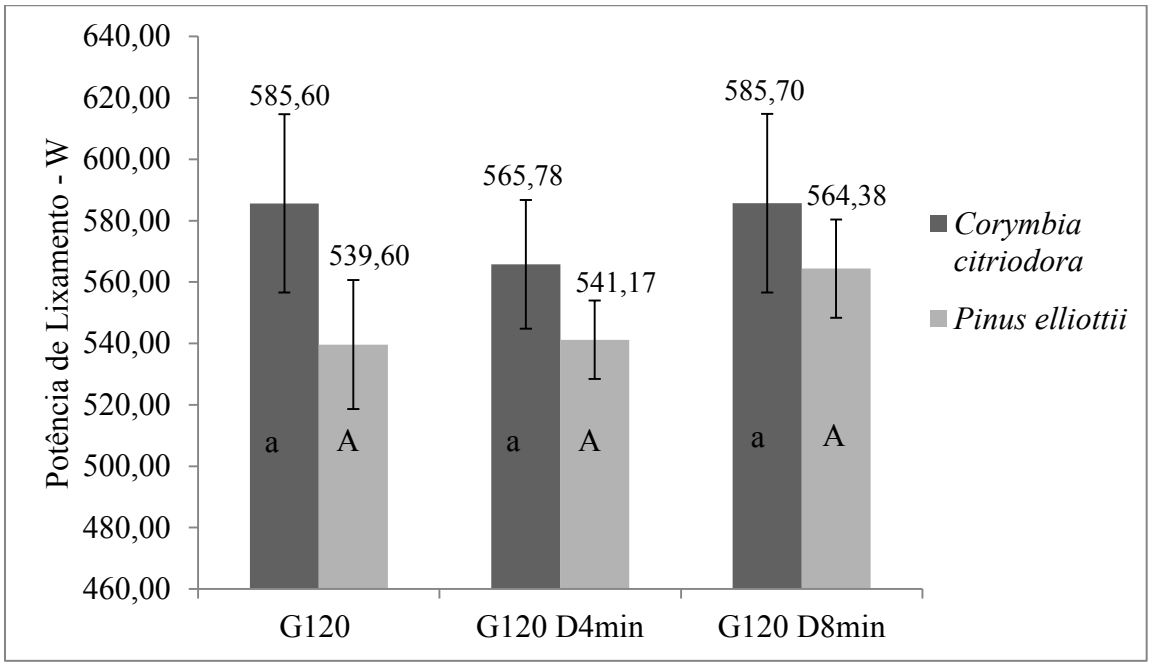


Figura 72 - Variação da potência de lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 120 *mesh*.



A *Corymbia citriodora* apresenta maiores valores de potência de lixamento quando analisada a granulometria de 120. Já para o *Pinus elliottii* os maiores valores de potência de lixamento são encontrados na lixa 80 para o grão abrasivo sem desgaste e com 4 minutos de desgaste e na granulometria 120 para o grão abrasivo com 8 minutos de desgaste.

5.4.3.2.Emissão acústica

Nas Figuras 73, 74 e 75 são expostos os valores obtidos, com a variação do desgaste abrasivo, para a emissão acústica no processo de lixamento para as granulometria 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de óxido de zircônio.

Analisando-se os valores de emissão acústica obtidos nota-se que para a *Corymbia citriodora* só há diferença entre os ensaios quando analisada a lixa de granulometria 120 *mesh* na qual o grão abrasivo sem desgaste é estatisticamente diferente do grão abrasivo com desgaste de 8 minutos. Porém o grão abrasivo com desgaste de 4 minutos é estatisticamente igual às duas variações configurações de ensaio. Para as outras duas granulometrias não há variações para a *Corymbia citriodora* quando comparada a influência do desgaste do grão abrasivo com a emissão acústica gerada no processo de lixamento.

Figura 73 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 80 *mesh*.

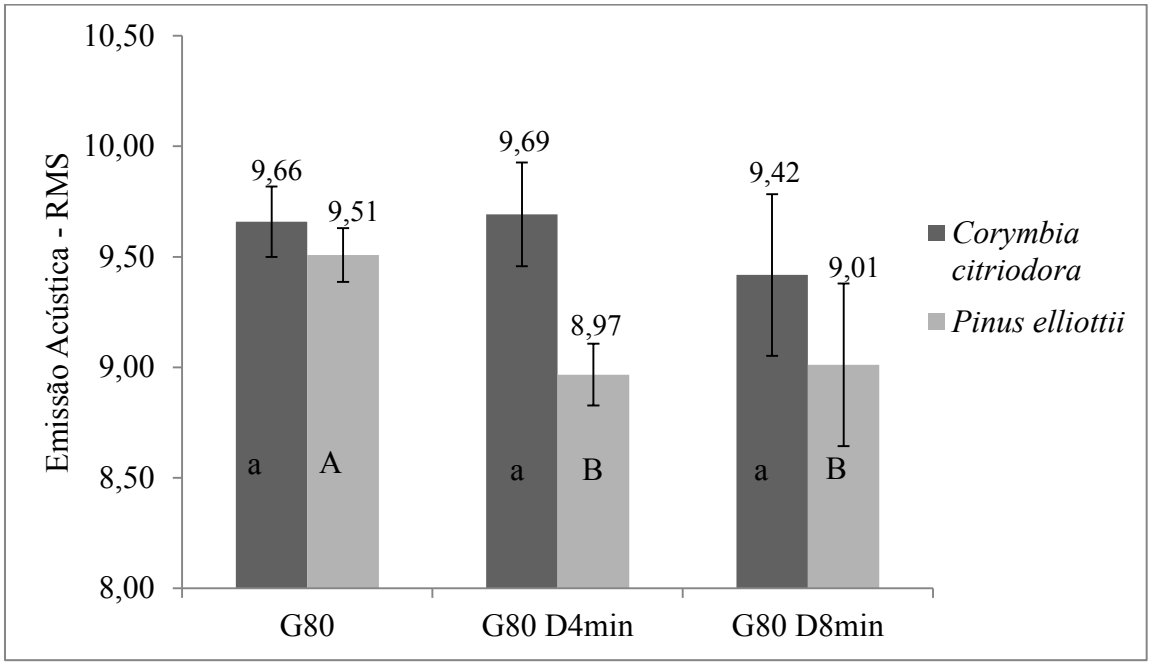


Figura 74 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 100 *mesh*.

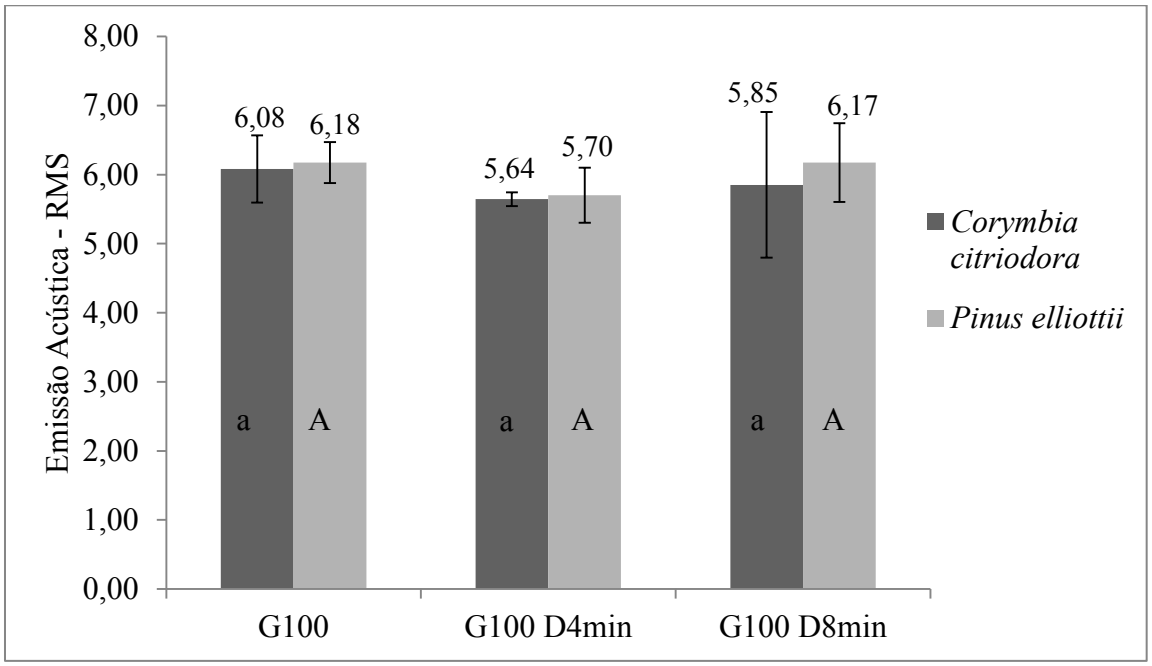
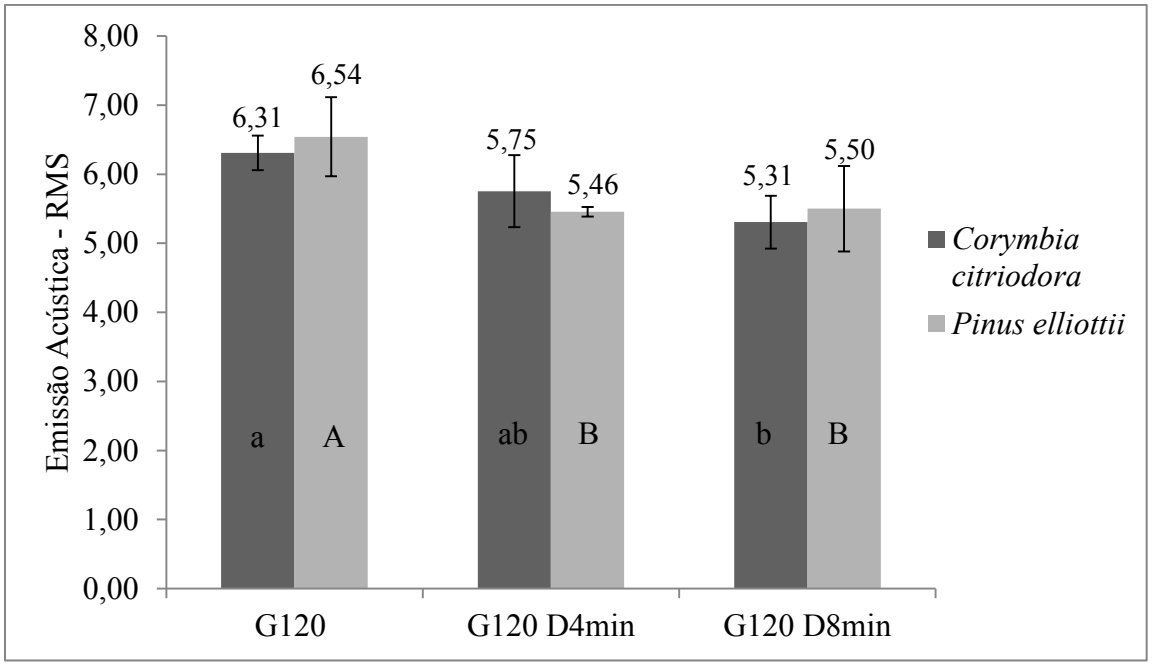


Figura 75 - Variação da emissão acústica no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 120 *mesh*.



Já para o *Pinus elliottii* o desgaste do grão abrasivo não gera influência significativa quando se analisa a granulometria de 100 *mesh*, mas para as granulometrias de 80 e 120 *mesh* a opção sem desgaste é estatisticamente diferente das demais condições de desgaste, 4 e 8 minutos. Os maiores valores de emissão acústica foram obtidos com a granulometria 80 e para todas as condições de desgaste.

5.4.3.3.Vibração

Nas Figuras 76, 77 e 78 são apresentados os valores obtidos, com a variação do desgaste abrasivo, para a vibração no processo de lixamento para as granulometria 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de óxido de zircônio.

Avaliando-se os resultados de vibração obtidos nos ensaios nota-se que para a granulometria de 80 *mesh* o desgaste do grão abrasivo não ocasionou nenhuma alteração estatisticamente significativa para os resultados com as variações realizadas nos ensaios, para ambas as espécies.

Figura 76 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 80 *mesh*.

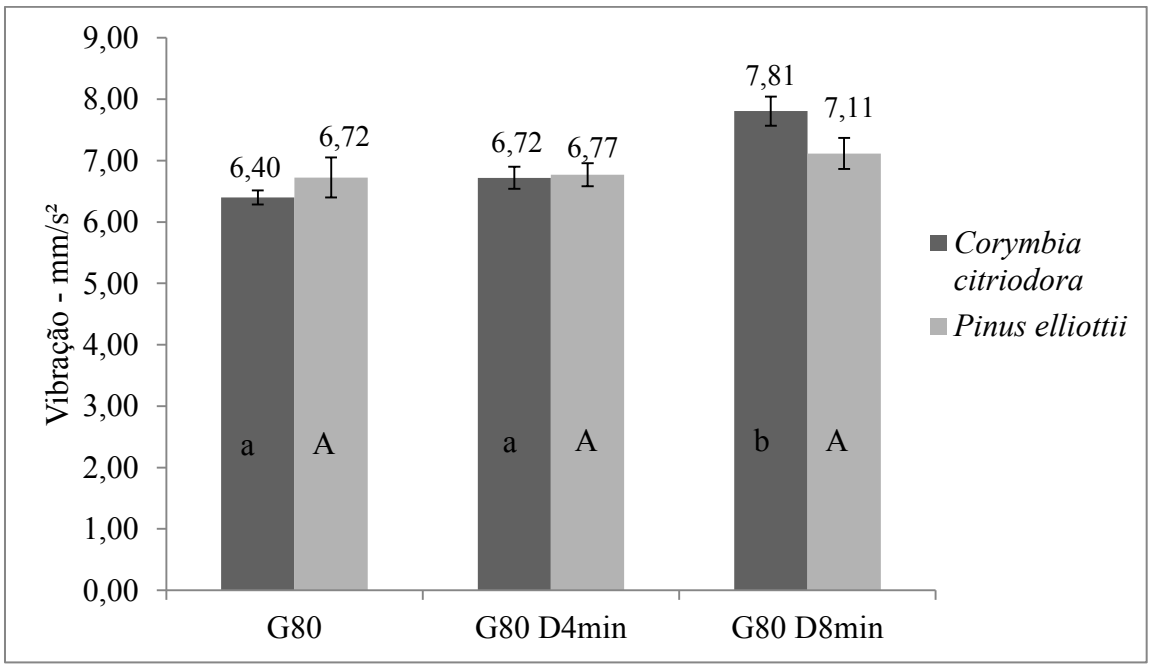


Figura 77 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 100 *mesh*.

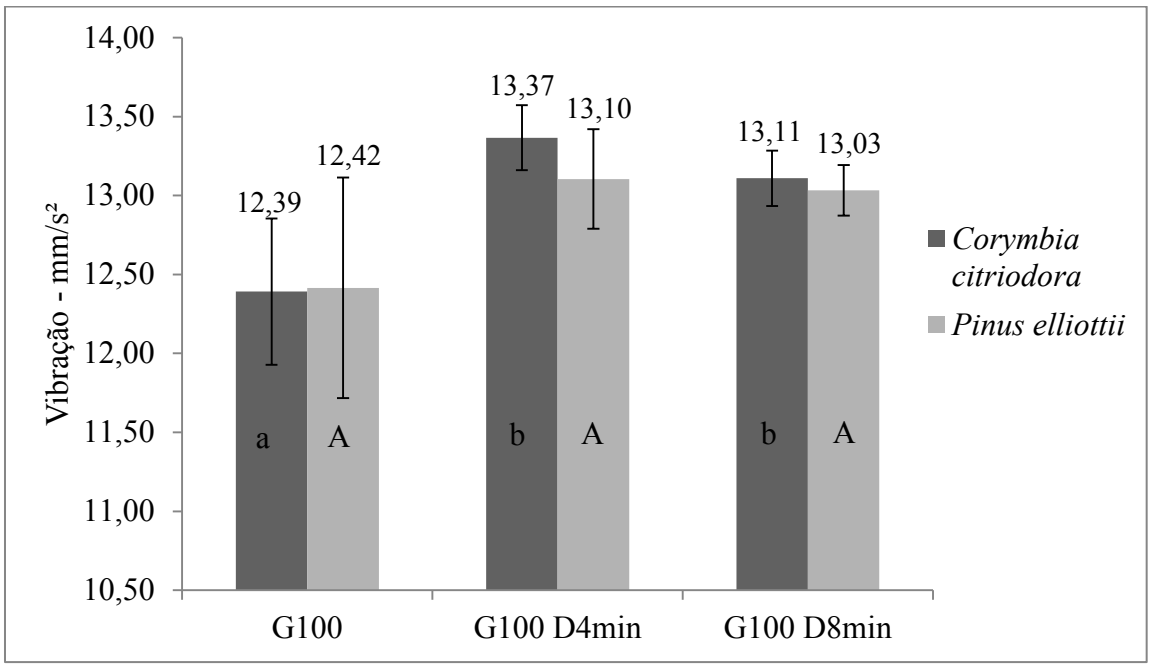
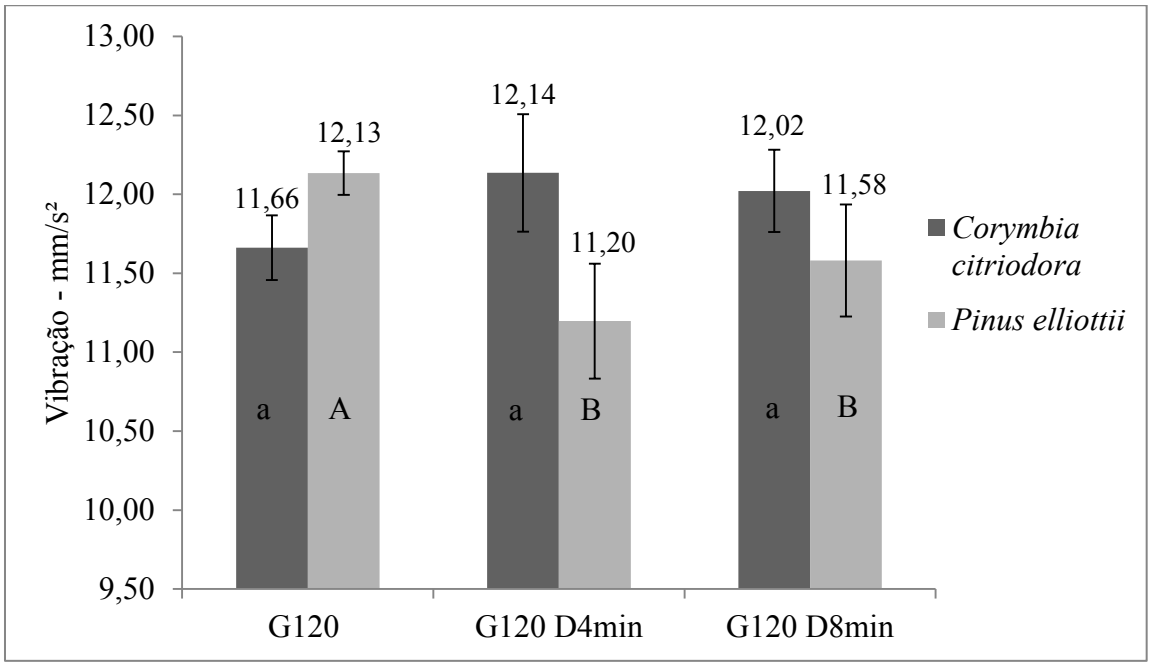


Figura 78 - Variação da vibração no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 120 *mesh*.



Quando analisamos a influência do desgaste na granulometria de 100 *mesh* nota-se que não há influência significativa do desgaste para os valores obtidos com o *Pinus* elliottii

enquanto que para a *Corymbia citriodora* o ensaio realizado com o grão abrasivo sem desgaste se difere, estatisticamente, das demais condições de desgaste.

Na granulometria de 120 *mesh* acontece o mesmo que na de 100 *mesh,* porém ocorre uma inversão entre as espécies, nela a *Corymbia citriodora* não sofre nenhuma influência do desgaste do grão abrasivo enquanto que no *Pinus elliottii* o grão abrasivo sem desgaste se difere dos demais.

Os menores valores de vibração foram encontrados com a granulometria de 80 *mesh* e os valores de 100 e 120 são muitos próximos. Observa-se uma tendência da vibração aumentar com o desgaste do grão abrasivo de óxido de zircônio, essa vibração não varia com o tempo de desgaste (4 ou 8 minutos).

5.4.3.4.Rugosidade

Nas Figuras 79, 80 e 81 são mostrados os valores de rugosidade média medidos, com a variação do desgaste abrasivo, para o processo de lixamento para as granulometria 80, 100 e 120 com os grãos abrasivos de óxido de zircônio.

Figura 79 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 80 *mesh*.

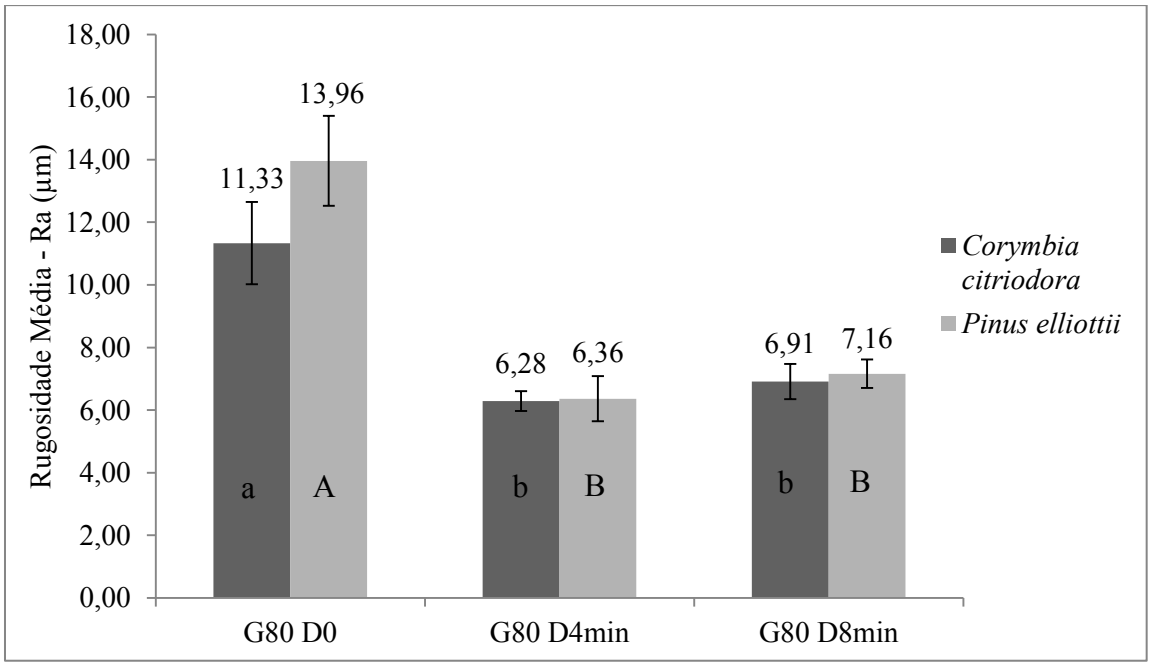


Figura 80 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 100 *mesh*.

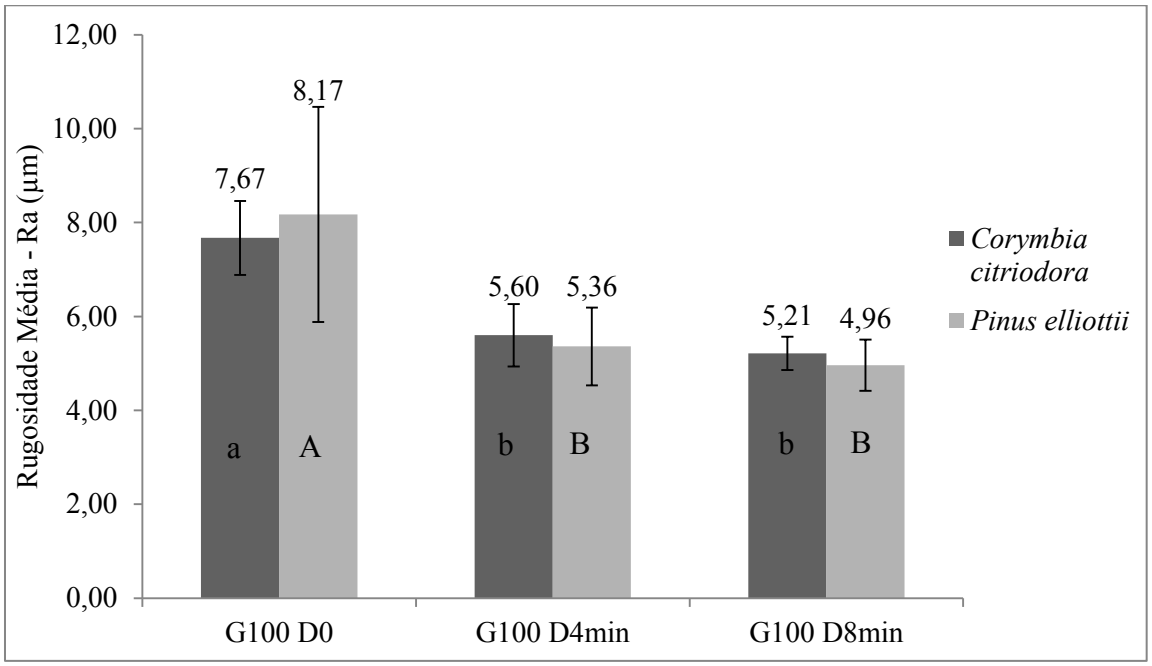
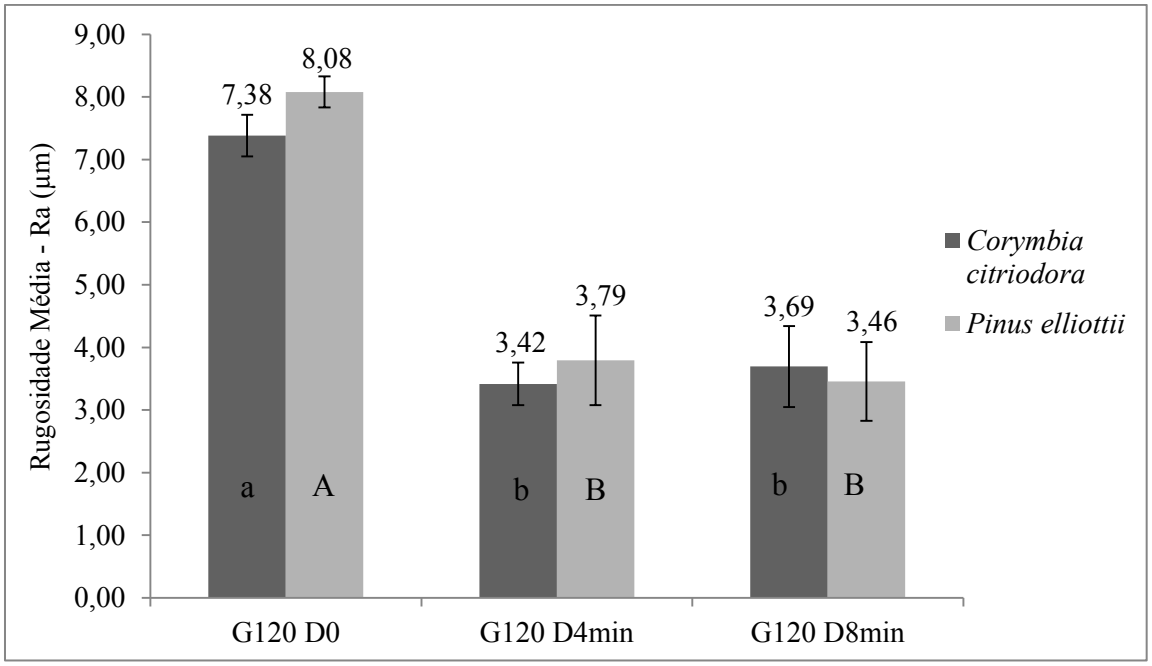


Figura 81 - Variação da rugosidade média no lixamento da *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* de acordo com o desgaste do abrasivo do óxido de zircônio para a granulometria de 120 *mesh*.



Ao analisarmos os resultados obtidos com a variação do desgaste para o grão abrasivo nota-se que, independente da granulometria, o desgaste influência significativamente na rugosidade média obtida, porém mais uma vez o tempo de desgaste do grão abrasivo não influência significativamente na qualidade superficial obtida no processo de lixamento.

Os maiores valores de rugosidade foram encontrados com a granulometria de 80 *mesh* e os menores valores para a granulometria de 120 *mesh*, para todas as configurações de desgaste e ambas as espécies.

Percebe-se que quando se analisa apenas os ensaios sem desgaste do grão abrasivo a *Corymbia citriodora* sempre obtém a melhor qualidade superficial, enquanto que para os ensaios com os grãos desgastados a qualidade superficial, quando compradas entre as espécies acabam não apresentando diferença significativa, sendo esta menor que 2% na maioria dos casos.

5.5.COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÃOS ABRASIVOS VARIANDO O DESGASTE ABRASIVO

Ao avaliar a influência do desgaste abrasivo nas variáveis de processo através do tipo do grão abrasivo pode-se notar que para a potência de lixamento no grão abrasivo de óxido de alumínio o desgaste do grão abrasivo teve uma influência muito baixa gerando diferenças significativas apenas na granulometria de 80 *mesh*, para a *Corymbia citriodora*, na qual o ensaio sem desgaste diferencia-se dos demais ensaios com desgaste. Já nos grãos abrasivos de carbeto de silício o desgaste teve uma influência maior, avaliando a potência de lixamento, sendo que influenciou significativamente nos ensaios com as granulometrias de 80, 100 e 120 *mesh* quando realizados com a *Corymbia citriodora* e para a granulometria de 80 *mesh* para o *Pinus elliottii*. Já para os grãos abrasivos de óxido de zircônio o desgaste do grão abrasivo não gerou nenhuma diferença significativa para a potência de lixamento em nenhuma configuração do ensaio utilizada.

O desgaste abrasivo gerou uma pequena influência na vibração com a lixa de óxido de alumínio com a granulometria de 100 *mesh* para a *Corymbia citriodora* diferenciando o grão sem desgaste do grão com maior desgaste (8 minutos). Para os ensaios da lixa de carbeto de silício não houve nenhuma influência significativa do desgaste para nenhuma configuração realizada nos ensaios. Já para o grão abrasivo de óxido de zircônio o desgaste influenciou significativamente as granulometrias 80 e 100 *mesh* para a *Corymbia citriodora*, onde na

granulometria 80 o ensaio com maior desgaste se diferencia dos demais e na granulometria 100 o ensaio do grão abrasivo sem desgaste se diferencia significativamente dos ensaios realizados com grãos desgastados. Ainda para esse abrasivo, a granulometria de 120 *mesh* sofreu uma influência significativa da lixa sem desgaste nenhum comparada com os ensaios com a lixa desgastada para o *Pinus elliottii*.

A variável rugosidade foi a que sofreu maior influência do desgaste do grão abrasivo das lixas. Percebe-se que a influência gerou quase a mesma tendência para todas as configurações de ensaio com apenas uma exceção. A tendência observada é que a rugosidade média sofre um decréscimo significativo quando comparamos a lixa sem nenhum desgaste abrasivo com as lixas que sofreram desgaste. Para uma comparação entre os períodos desgastados apenas a granulometria de 100 *mesh* do grão abrasivo de óxido de alumínio obteve 3 valores significativamente diferentes para as 3 condições de desgaste no lixamento da *Corymbia citriodora*. Nos demais ensaios constatou-se que não houve diferença significativa quando se compara os 2 tipos de desgaste realizados (4 e 8 minutos) para os 3 tipos grãos abrasivos utilizados, suas granulometrias e as 2 espécies.

Os melhores valores de rugosidade encontrados foram para os grãos de óxido de alumínio e suas granulometrias, enquanto que os piores foram para óxido de zircônio. O carbeto de silício obteve valores muito mais próximos dos piores valores de rugosidade. Os grãos abrasivos influenciaram significativamente na qualidade superficial obtida, pois suas propriedades variam muito de acordo com o tipo utilizado. O óxido de alumínio possui baixa friabilidade, isto é, o grão abrasivo dificilmente se fratura desgastando as suas arestas de corte e gerando um formato mais circular, com isso ao invés de cortar o material ele acaba compactando as imperfeições na superfície fazendo com que a mesma atinja boa qualidade superficial. Já o carbeto de silício é o grão abrasivo mais plano utilizado nesse trabalho e consequentemente possui boa friabilidade; isto garante que ele sempre possua arestas de corte novas. Já o óxido de zircônio é um grão de óxido de alumínio tratado com zircônio a fim de melhorar sua superfície arredondada e friabilidade, deixando o grão mais agressivo e com isso friável.

5.6.ANÁLISE DE IMAGENS

Neste tópico serão apresentadas as imagens de MEV e topografia obtidasna superfície dos corpos de prova para a lixa de óxido de alumínio, que obteve melhores resultados de rugosidade média, com grãos de óxido de alumínio.

5.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

5.6.1.1.Pinus elliottii

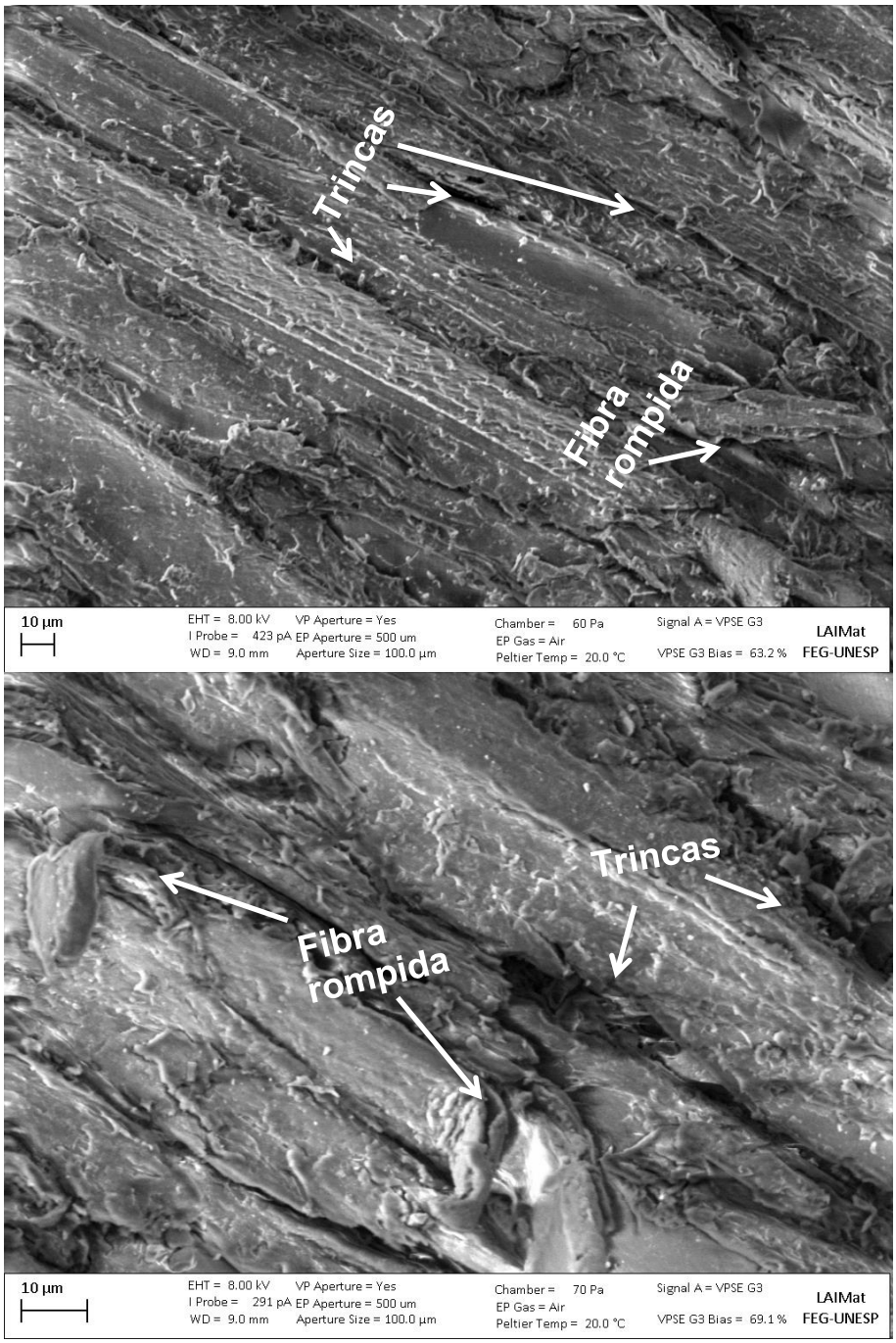
Na Figura 82 são mostradas as imagens de MEV geradas pela condição de ensaio com o grão abrasivo de óxido de alumínio com a granulometria de 80 *mesh* sem que houvesse desgaste abrasivo. Na ampliação de 1000x nota-se que há uma grande quantidade de fibras rompidas incompletamente que não se desligaram da superfície lixada.

Como o lixamento foi realizado na direção paralelas às fibras observa-se também que o processo de lixamento começa a bloquear as células radiais da madeira e assim diminuindo a quantidade de picos e vales na superfície lixada. Quanto ao processo de lixamento fica claro a direção de lixamento bem como as ranhuras causadas devido ao contato do grão abrasivo com o corpo de prova.

Quando se avalia a imagem com o aumento de 2000x fica claro que há fibras segmentadas que o processo de lixamento não foi capaz de remover completamente e fica evidente o bloqueio das células radiais da madeira. Também é possível notar que o processo de lixamento não remove camadas de fibras completamente e sim vai desgastando as fibras até que ela seja removida; também nota-se alguns rasgos nas fibras existentes sobre a superfície.

Na Figura 83 são apresentadas as imagens de microscopia obtida com a granulometria de 80 *mesh* com 4 minutos de desgaste do grão abrasivo. Analisando a ampliação de 1000x nota-se que há menos aberturas nas fibras sobre a superfície lixada, constata-se também que há mais material compactado sobre a superfície de lixamento impedindo que as imperfeições da madeira apareçam.

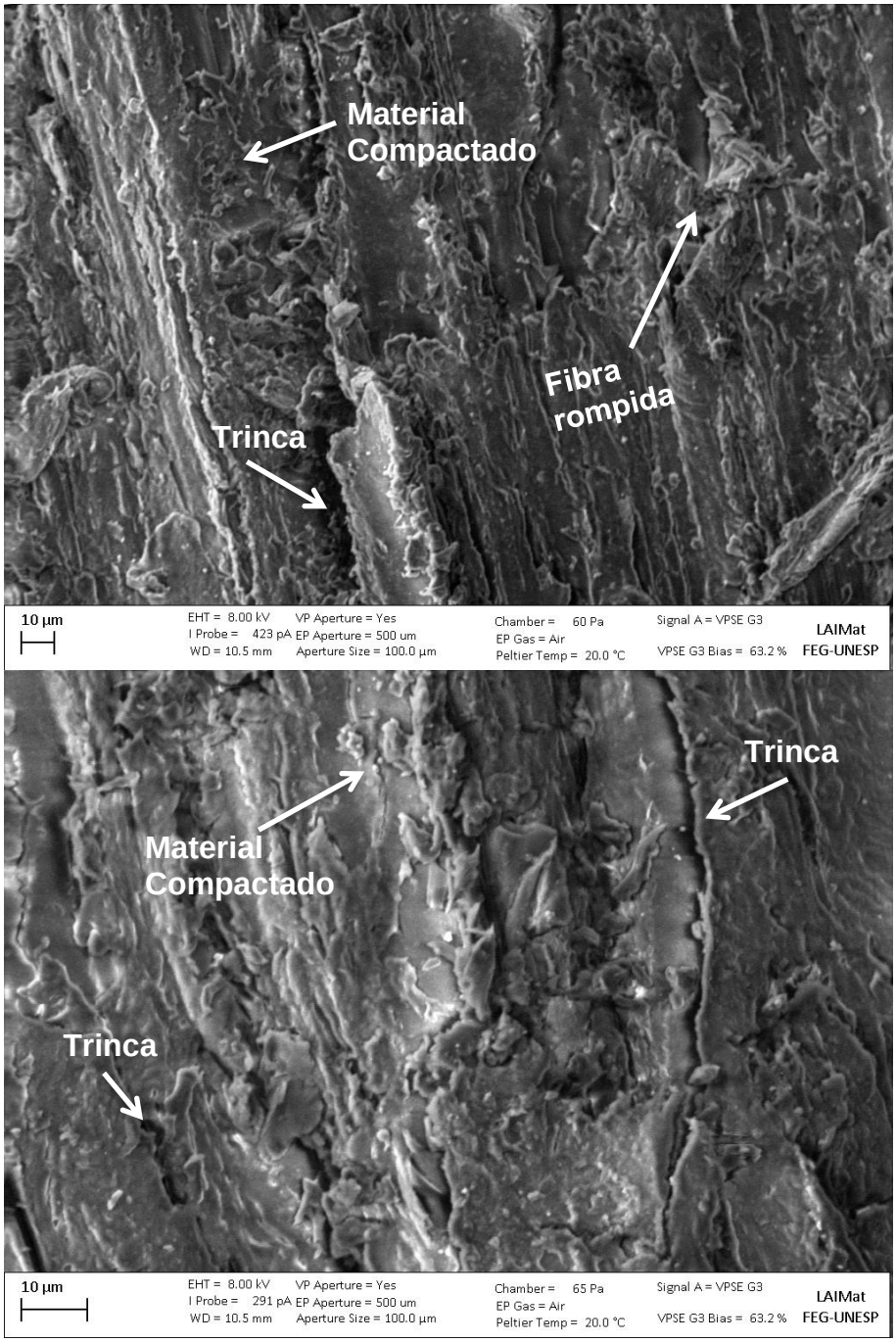
Figura 82 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 80 *mesh* sem desgaste.



Porém a aparência da superfície parece mais esmagada do que cortada como observado na Figura 82. Isso se deve ao desgaste abrasivo do grão, pois no óxido de alumínio o grão tende a ter um perfil mais arredondado do que sofrer grandes fraturas restaurando suas arestas de corte. Nessa condição constata-se que não há grande quantidade de fibras desprendidas da superfície lixada.

Quando se avalia a ampliação de 2000x a situação de compactação do material na superfície fica mais evidente. Também há algumas fibras as quais estão com sua superfície começando a se romper, como avaliado na condição anterior.

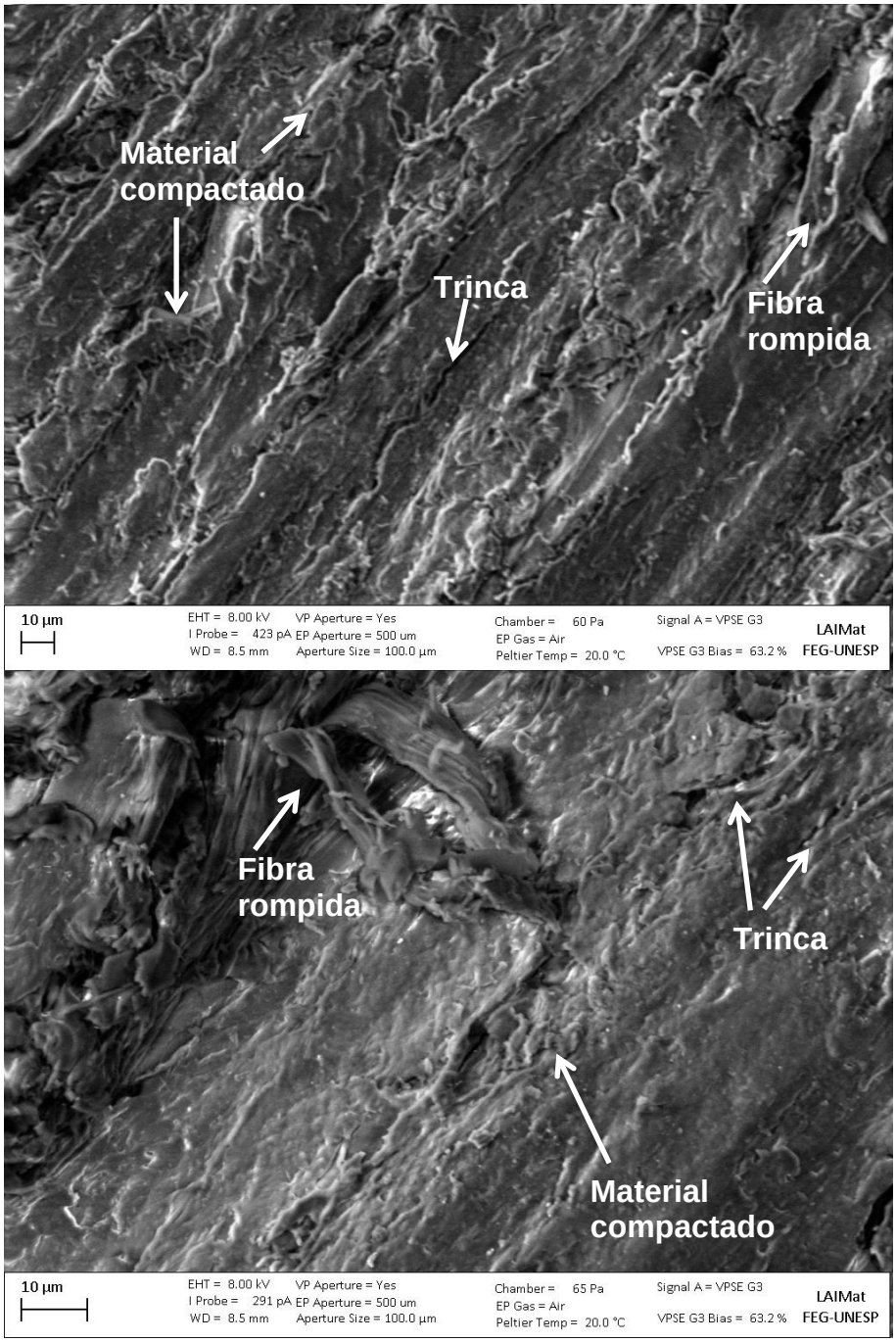
Figura 83 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 80 *mesh* com desgaste de 4 minutos.



Analisando-se a Figura 84, pode se notar as mesmas características vistas na figura anterior, uma aparência superficial amassada com uma grande quantidade de material

compactado e poucas fibras com grande estado de degradação. Quando avaliada a imagem com 2000x de aumento percebe-se que algumas fibras não conseguiram aderir à superfície ficando soltas.

Figura 84 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 80 *mesh* com desgaste de 8 minutos.

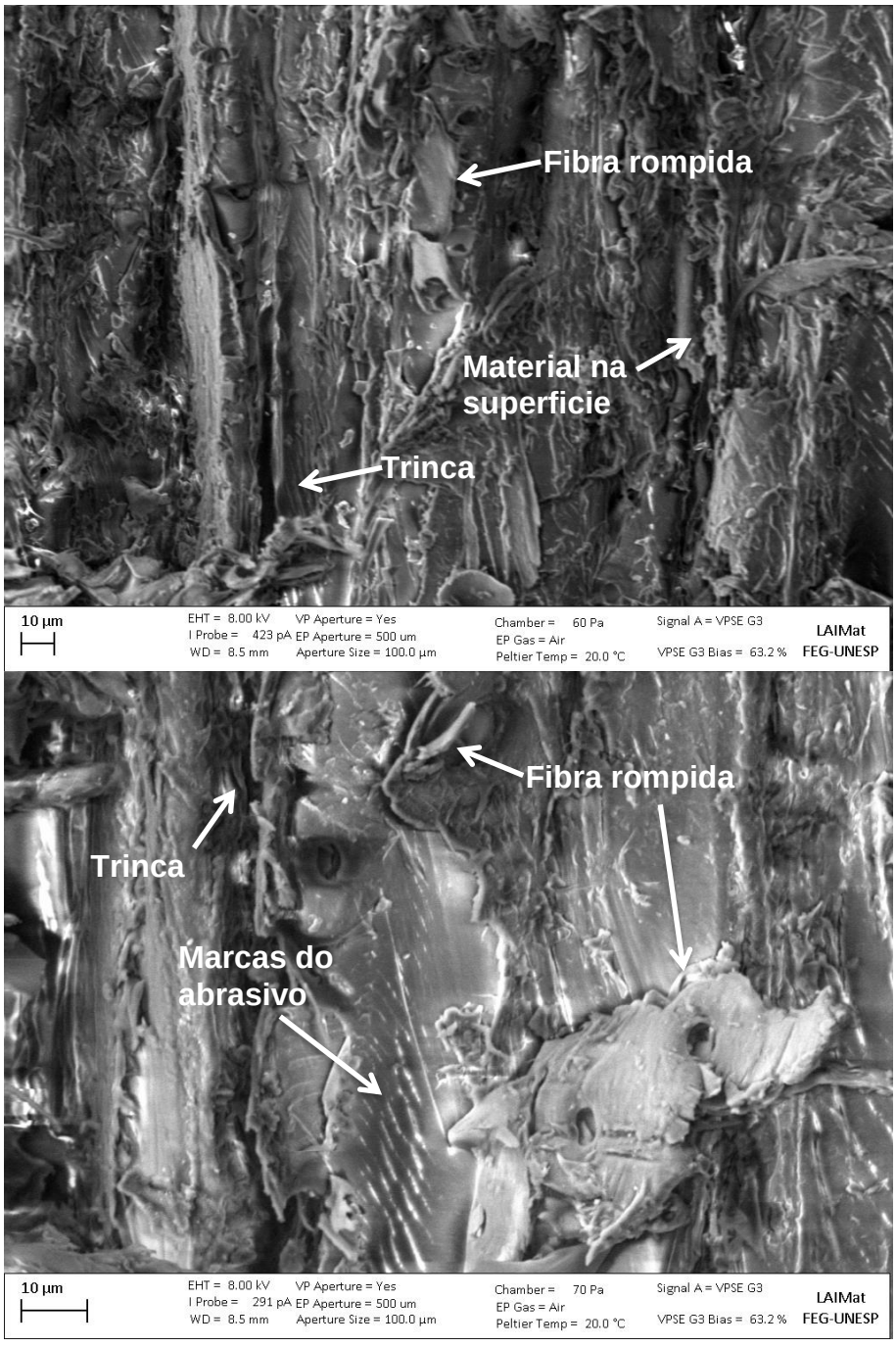


Analisando-se a Figura 85 pode se observar uma grande quantidade de fibras desprendidas na superfície do material lixado. Avaliando a ampliação de 1000x nota-se pela

primeira vez que o processo de lixamento foi preciso o suficiente para o aparecimento de algumas pontoações das traqueídes do *Pinus elliottii*. Nota-se que há alguns vales maiores do que os gerados pelo processo de lixamento não apresentando a característica da superfície lixada ao seu lado.

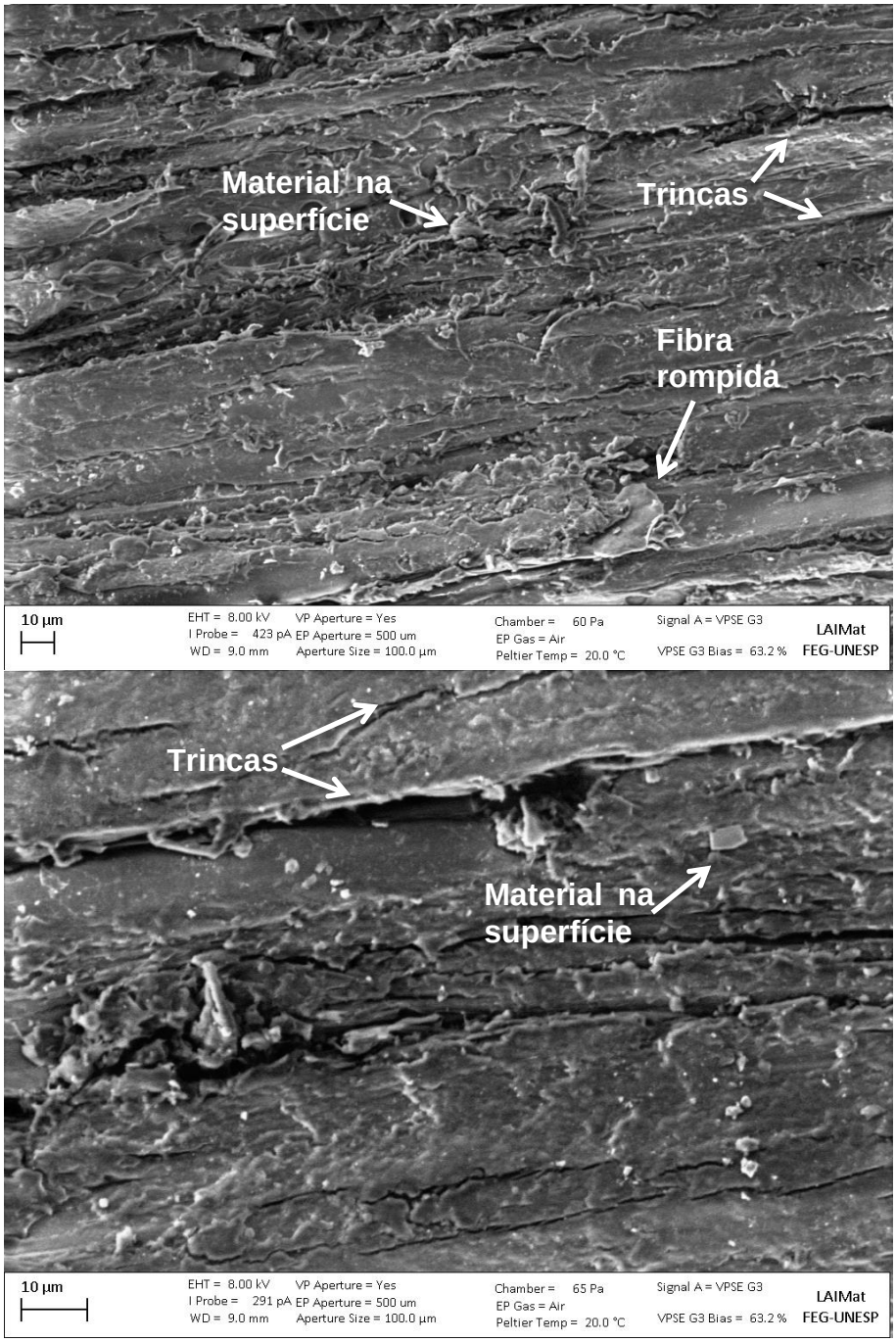
Avaliando a ampliação de 2000x percebe-se que há pontos da superfície com pouca compactação do material de material e alguns riscos na superfície das traqueídes.

Figura 85 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 100 *mesh* sem desgaste.



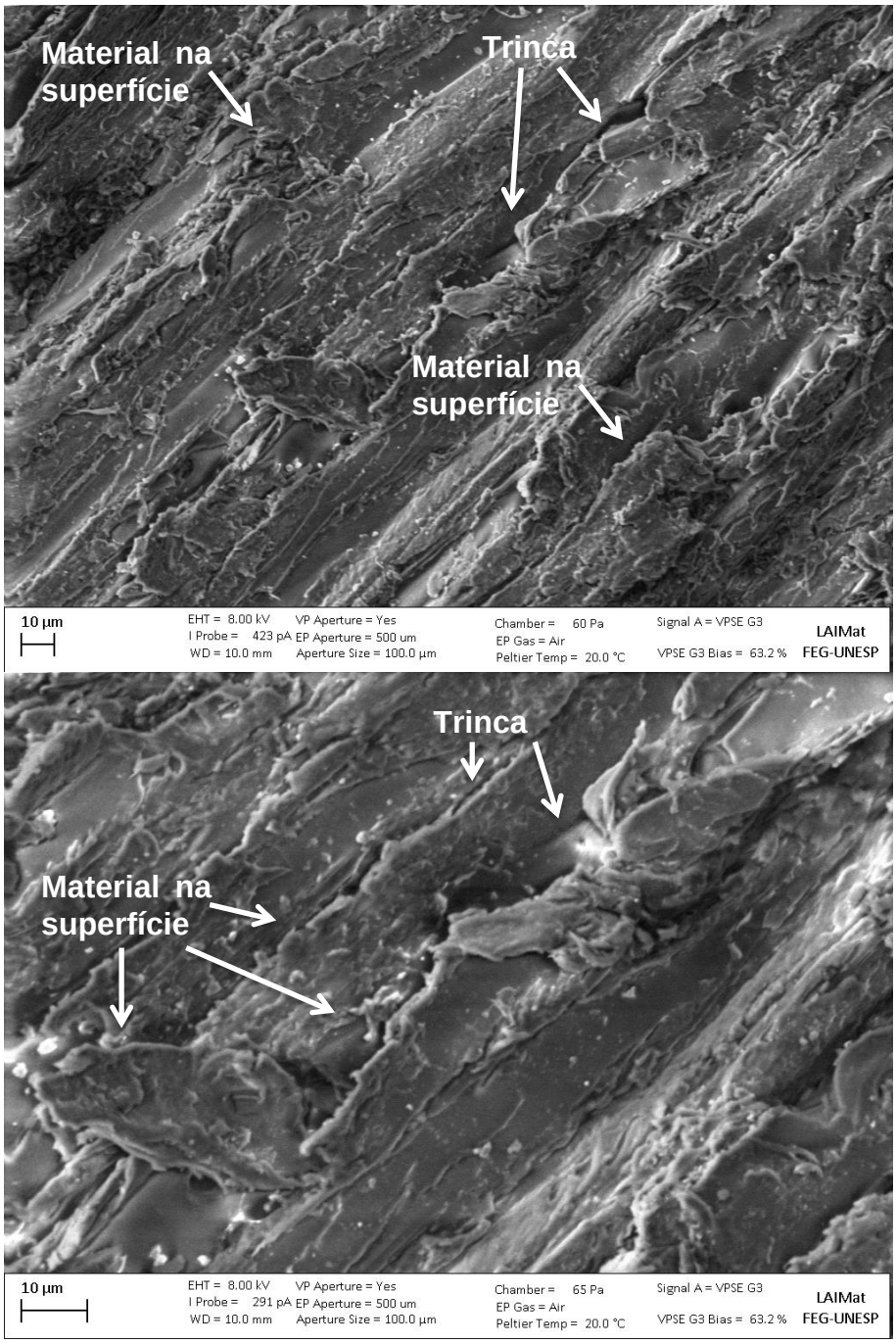
Analisando a Figura 86 percebe-se a direção do lixamento bem como algumas fibras fracionadas na superfície. A diferença dessa figura com a condição anterior é que se nota que há uma quantidade maior de material compactado na superfície. Também se nota algumas imperfeições geradas pela própria lixa durante o processo de lixamento. Na ampliação de 2000x fica claro a compactação de material removido durante o processo de lixamento para dentro das superfícies maiores e também fica evidente os danos do processo na superfície.

Figura 86 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 100 *mesh* com desgaste de 4 minutos.



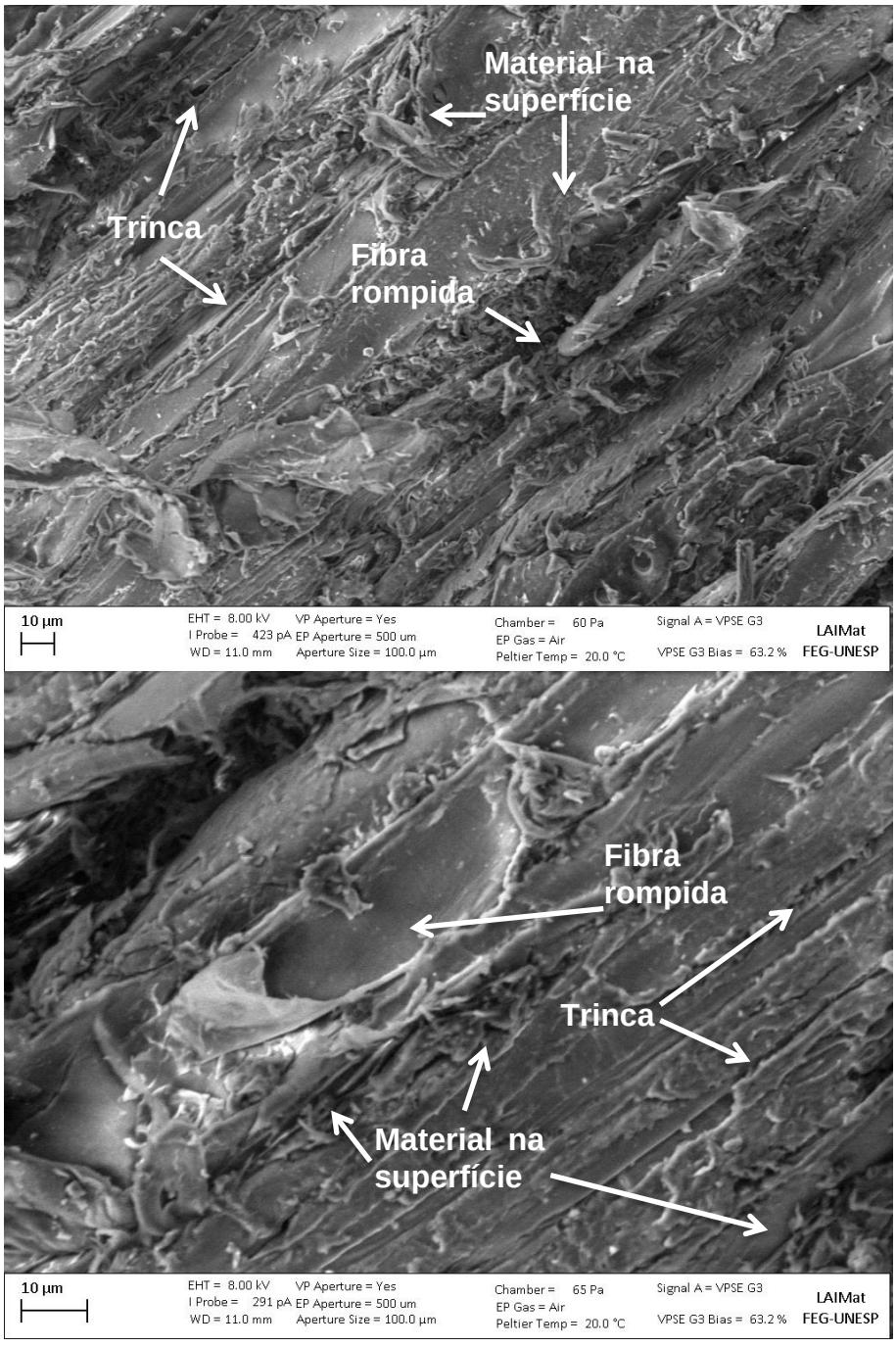
Analisando-se a Figura 87 nota-se que algumas imperfeições foram sobrepostas por material removido, também percebe-se algumas imperfeições ocasionadas pelo processo de lixamento. Analisando a ampliação de 2000x nota-se a aparência amassada de alguns segmentos de fibras.

Figura 87 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 100 *mesh* com desgaste de 8 minutos.



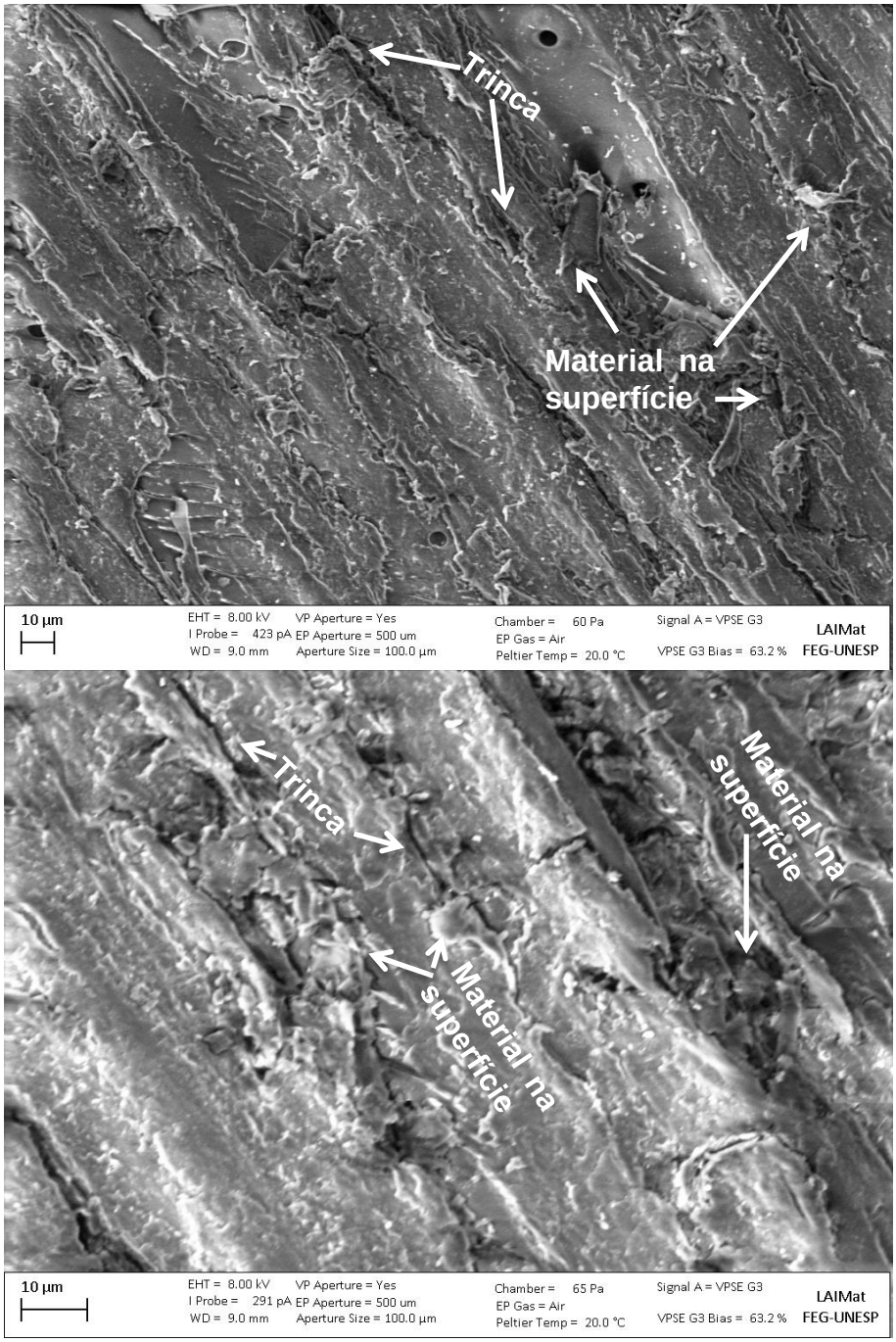
Na Figura 88 são observadas marcas mostrando a direção de lixamento, assim como nas outras granulometrias sem desgaste do grão abrasivo, também é possível notar que há bastante material fragmentado e solto na superfície lixada. Nota-se que há regiões que não apresentam a aparência de uma superfície lixada. Quando analisadas as ampliações de 2000x percebe-se uma fibra rompida parcialmente bem como as marcas geradas pelo processo na superfície do material.

Figura 88 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 120 *mesh* sem desgaste.



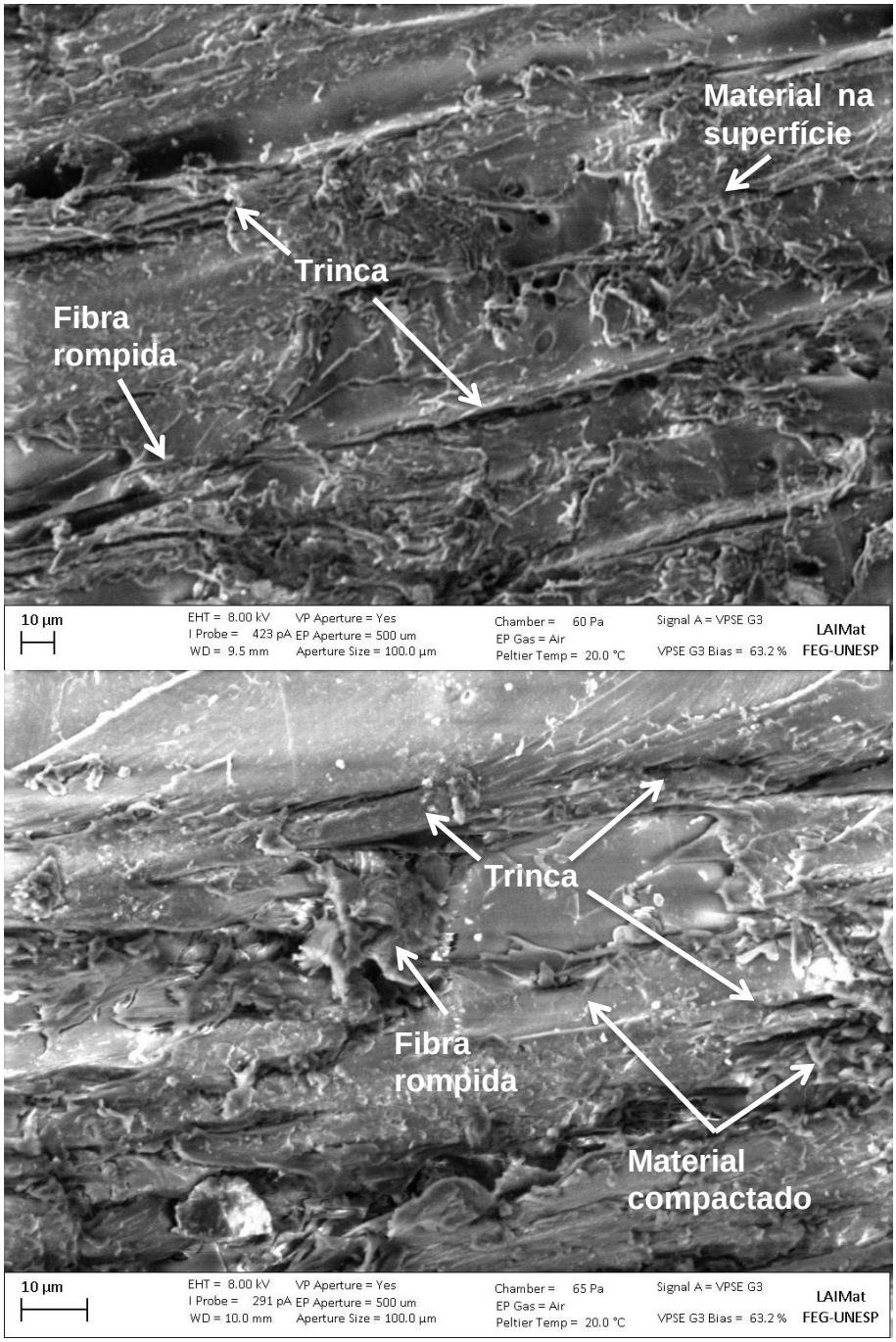
Observando-se a Figura 89 nota-se que há uma superfície com melhor qualidade sem aparentar grande variação no seu perfil. É possível ver as pontoações das traqueídes. Também é possível perceber uma menor quantidade de material fragmentado e solto sobre a superfície. Analisando-se a ampliação de 2000x é possível ver o material compactado sobre as imperfeições ocasionadas durante o processo e algumas imperfeições relacionadas com a anatomia da madeira.

Figura 89 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 120 *mesh* com desgaste de 4 minutos.



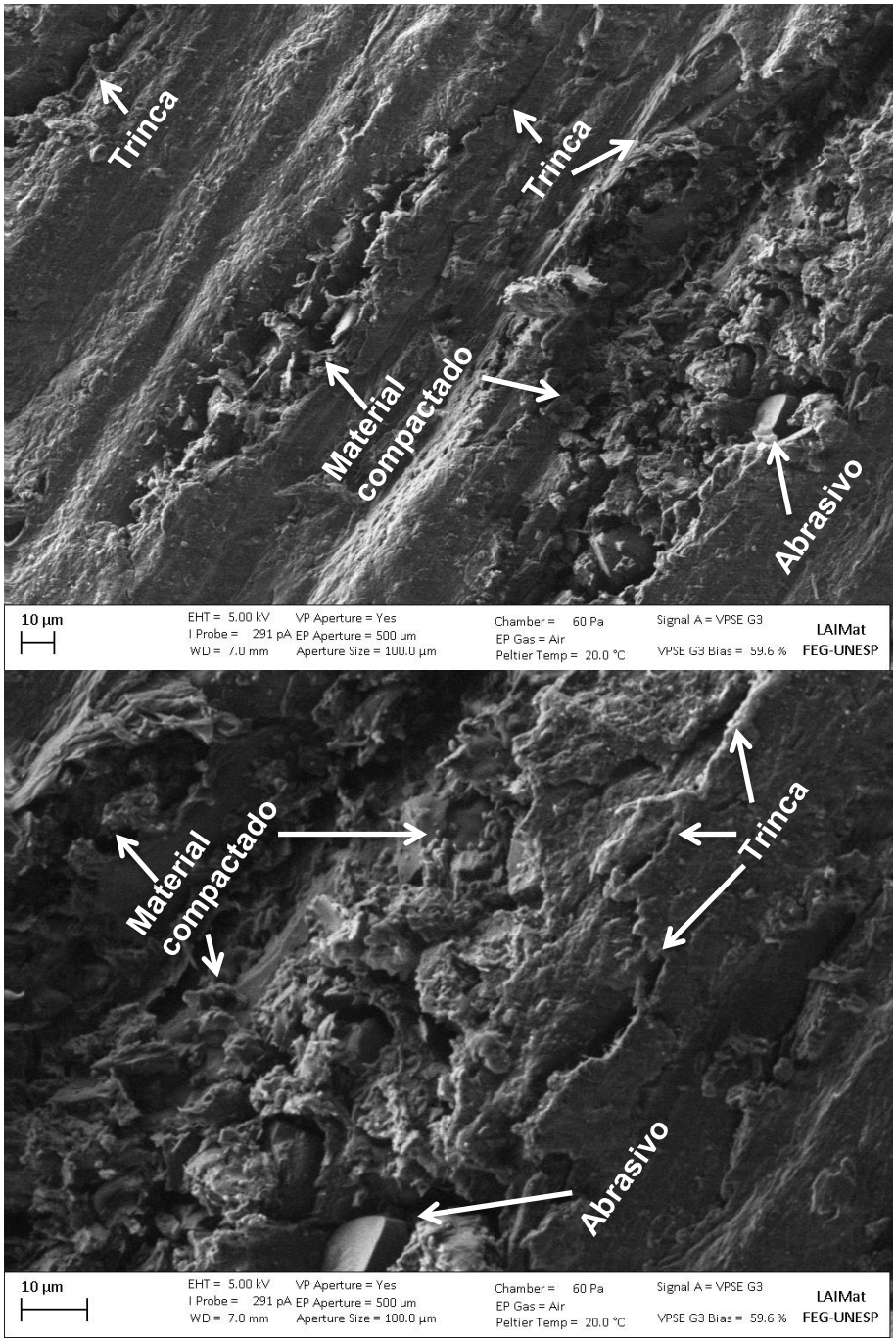
Analisando-se a Figura 90 nota-se que o material apresenta uma grande quantidade de material compactado em sua superfície após o processo de lixamento. Também se percebe que há algumas regiões onde não há marcas do processo de lixamento superfície. Quando se analisa a ampliação de 2000x fica evidente a compactação de parte do material lixado dentro das imperfeições da superfície. Também é possível notar alguns danos do grão abrasivo sobre a superfície do *Pinus elliottii*.

Figura 90 - MEV do *Pinus elliottii* lixado com a granulometria 120 *mesh* com desgaste de 8 minutos.



Na Figura 91 é apresentado o primeiro ensaio de MEV com a *Corymbia citriodora* com a lixa 80 sem desgaste no grão abrasivo. Pode-se notar, analisando a imagem, que há uma degradação da superfície com o processo de lixamento, e este cria algumas imperfeições devido ao formato do grão abrasivo. Nota-se uma região à direita da imagem onde há um desgaste grande na superfície com um corpo estranho à estrutura da madeira.

Figura 91 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 80 *mesh* sem desgaste.

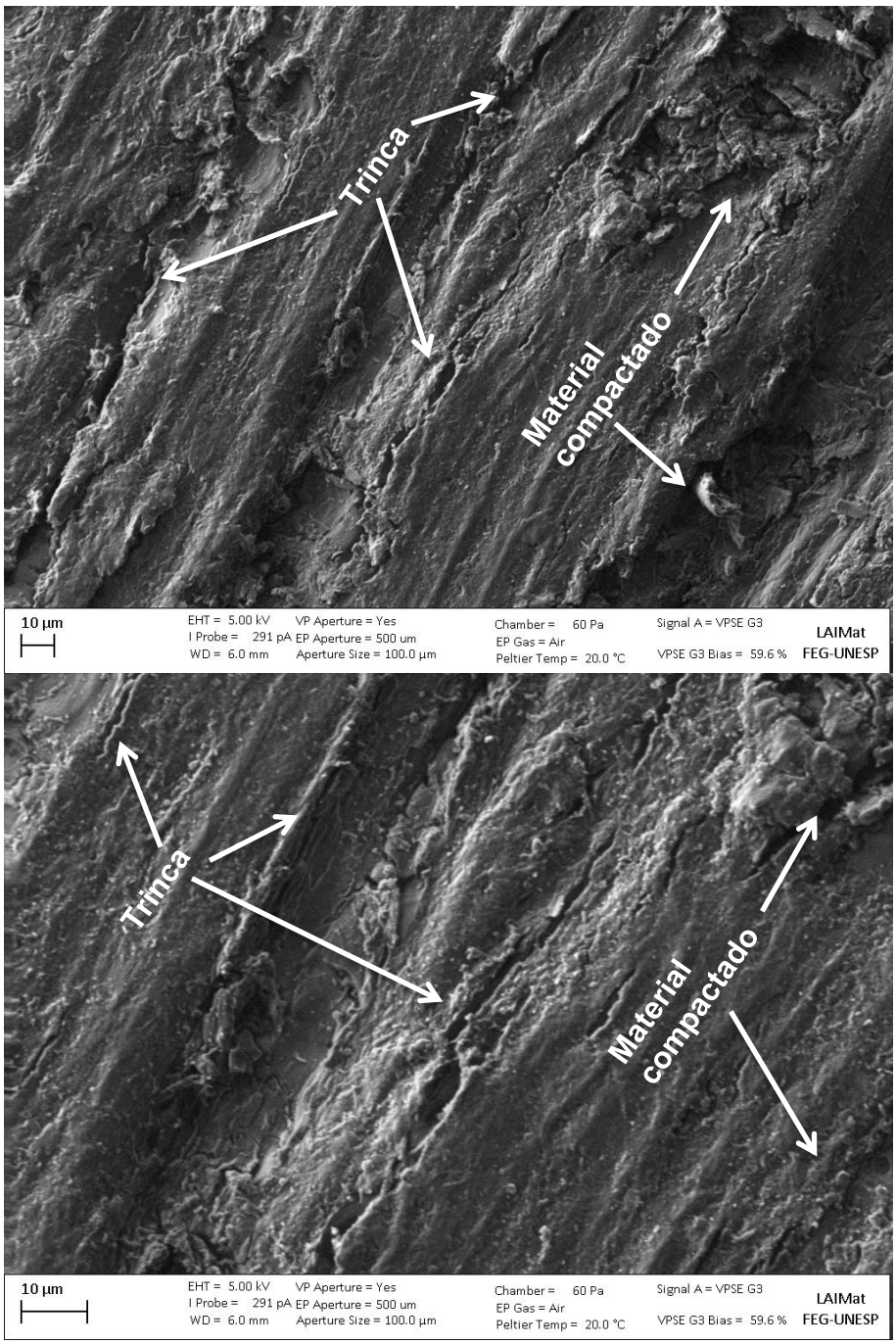


Analisando a ampliação de 2000x percebe-se que na região severamente degradada há uma grande quantidade de material compactado, essa região possivelmente era uma zona onde a madeira possuía uma grande imperfeição anatômica e o tamanho do grão abrasivo não foi suficiente para remover esse defeito, porém ele compensou compactando o material sobre o defeito.

Também se nota que na primeira imagem do *Corymbia citriodora* há um número bem maior de micro trincas quando comparado com as imagens obtidas com o *Pinus elliottii*.

Na Figura 92 são apresentadas as imagens com o primeiro nível de desgaste para a granulometria de 80 *mesh*. Analisando a ampliação de 1000x percebe-se que há uma superfície mais limpa e com material compactado em regiões pontuais. Também é possível notar algumas fibras degradadas na superfície lixada quando comparamos com a condição vista anteriormente. Percebe-se que há uma região onde a superfície parece compactada com uma parte da fibra rompida. Ao analisar a ampliação de 2000x nota-se algumas rachaduras na superfície do material devido ao processo de lixamento bem como os vales que o grão abrasivo gera devido sua profundidade de corte. Mais uma vez há o aparecimento de micro trincas em sua superfície que podem ser provenientes das tensões internas devido ao crescimento acelerado da espécie.

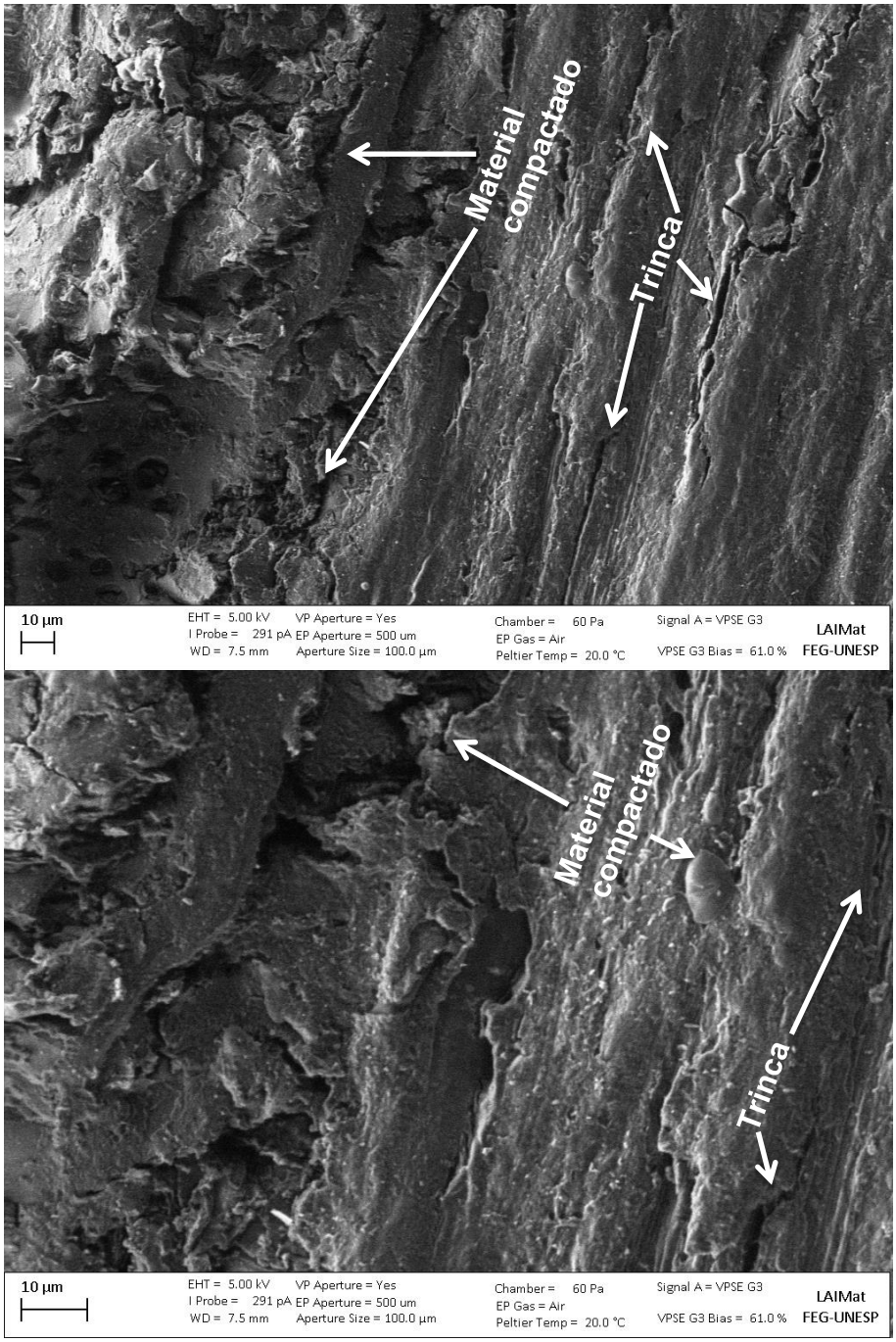
Figura 92 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 80 *mesh* com desgaste de 4 minutos.



Na Figura 93 são apresentadas as imagens obtidas com a condição mais severa de desgaste para a granulometria de 80 *mesh*. Nota-se que há duas regiões distintas na imagem sendo que a parte mais à direita possui uma superfície mais limpa com alguns danos gerados pelo processo de lixamento e mais à direita uma região bastante irregular e com muito material compactado na superfície. Mais uma vez parece que essa região com muito material compactado é um local onde existia um defeito anatômico da madeira. A ampliação de 2000x

mostra trincas geradas pelo processo e imperfeições anatômicas; ambos os defeitos apresentam material compactado no seu interior. Mais uma vez fica perceptível uma grande quantidade de micro trincas nas imagens.

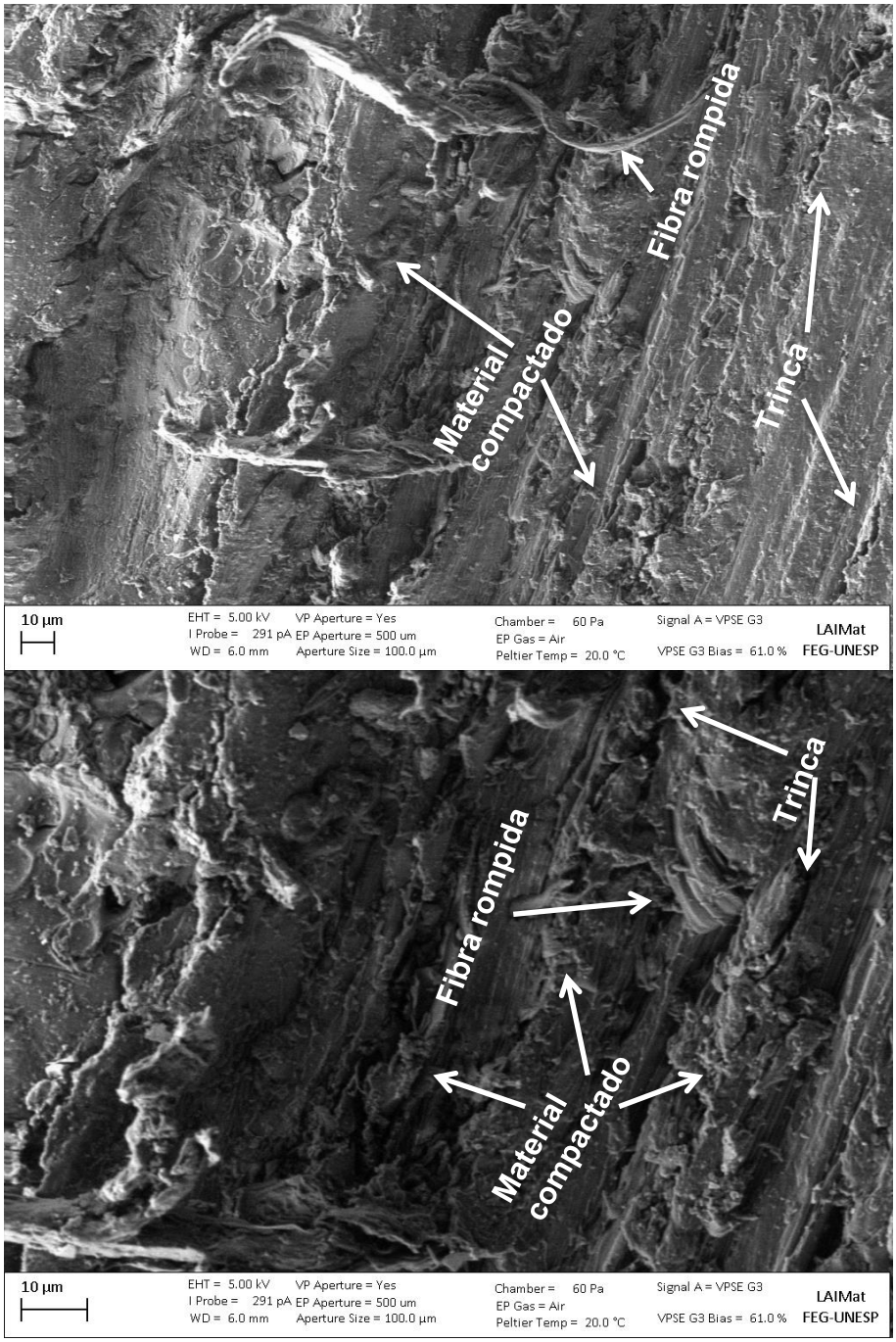
Figura 93 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 80 *mesh* com desgaste de 8 minutos.



Na Figura 94 é possível notar uma superfície com marcas do processo de lixamento e algumas fibras soltas na superfície. Nota-se algumas regiões que não apresentam as marcas

geradas pelo grão abrasivo e pouco material compactado, concentrando-se em regiões pontuais. Quando se analisa a ampliação de 2000x evidencia-se o material solto na superfície e mais cortado pelo grão abrasivo, bem como algumas fibras rompidas.

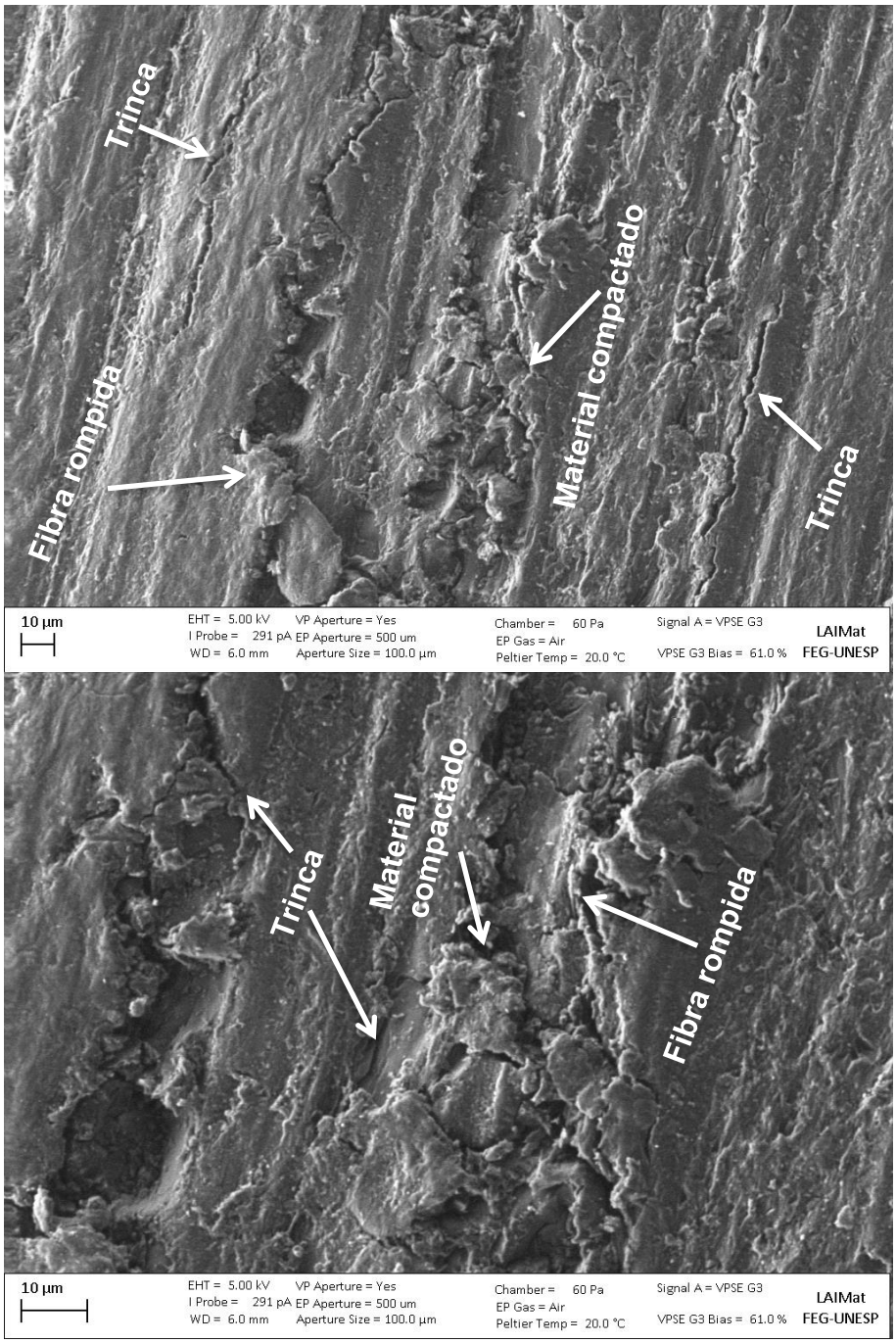
Figura 94 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 100 *mesh* sem desgaste.



Na Figura 95 visualiza-se uma superfície mais limpa com marcas do processo de lixamento. A superfície apresenta material compactado em sua superfície e algumas regiões

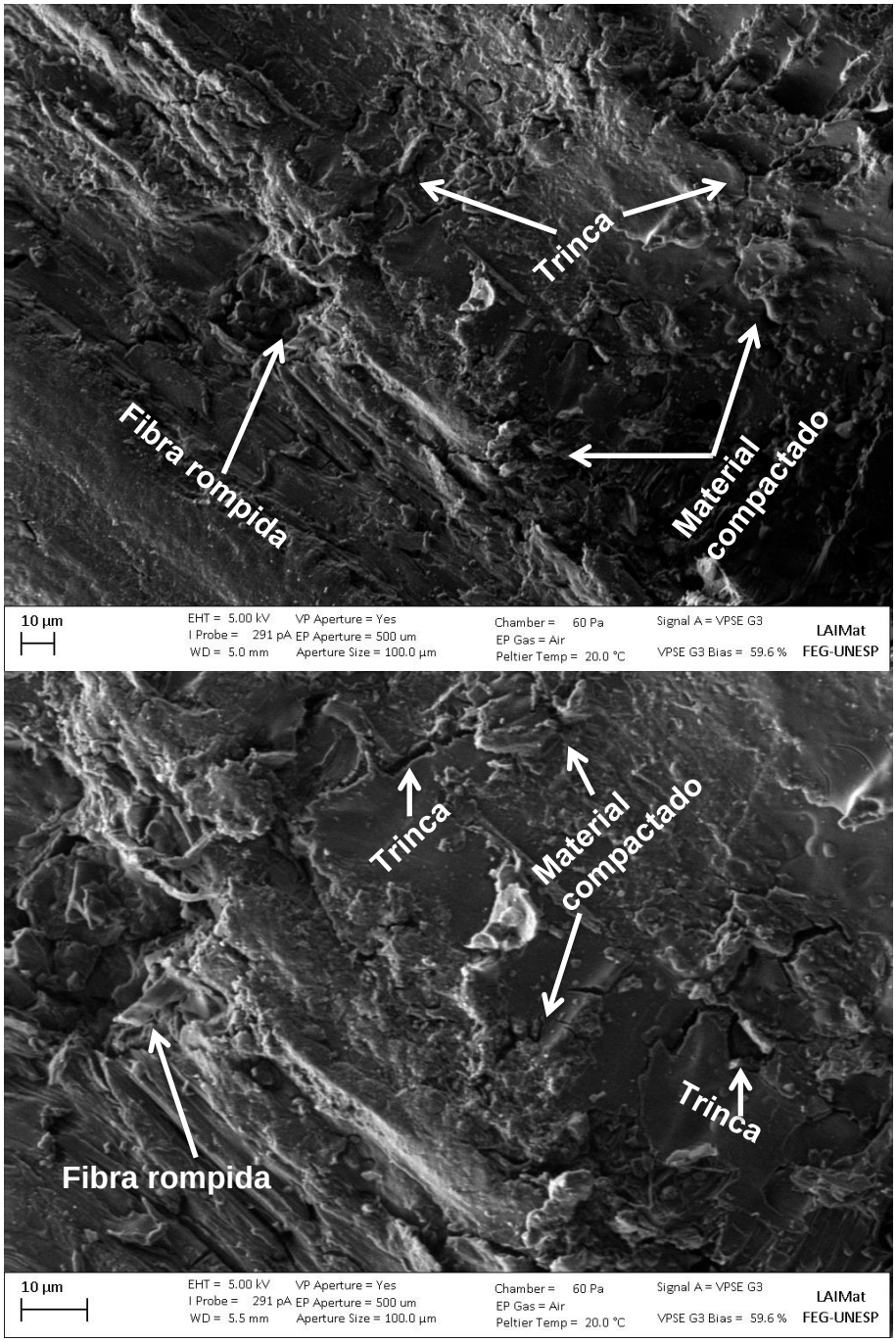
onde há alguns vales devido o afundamento da fibra devido a pressão de lixamento bem como a falta de arestas de corte afiadas no grão abrasivo. Quando se observa a ampliação de 2000x tornam-se evidentes as micro rachaduras na superfície lixada e o material compactado em alguns vales.

Figura 95 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 100 *mesh* com desgaste de 4 minutos.



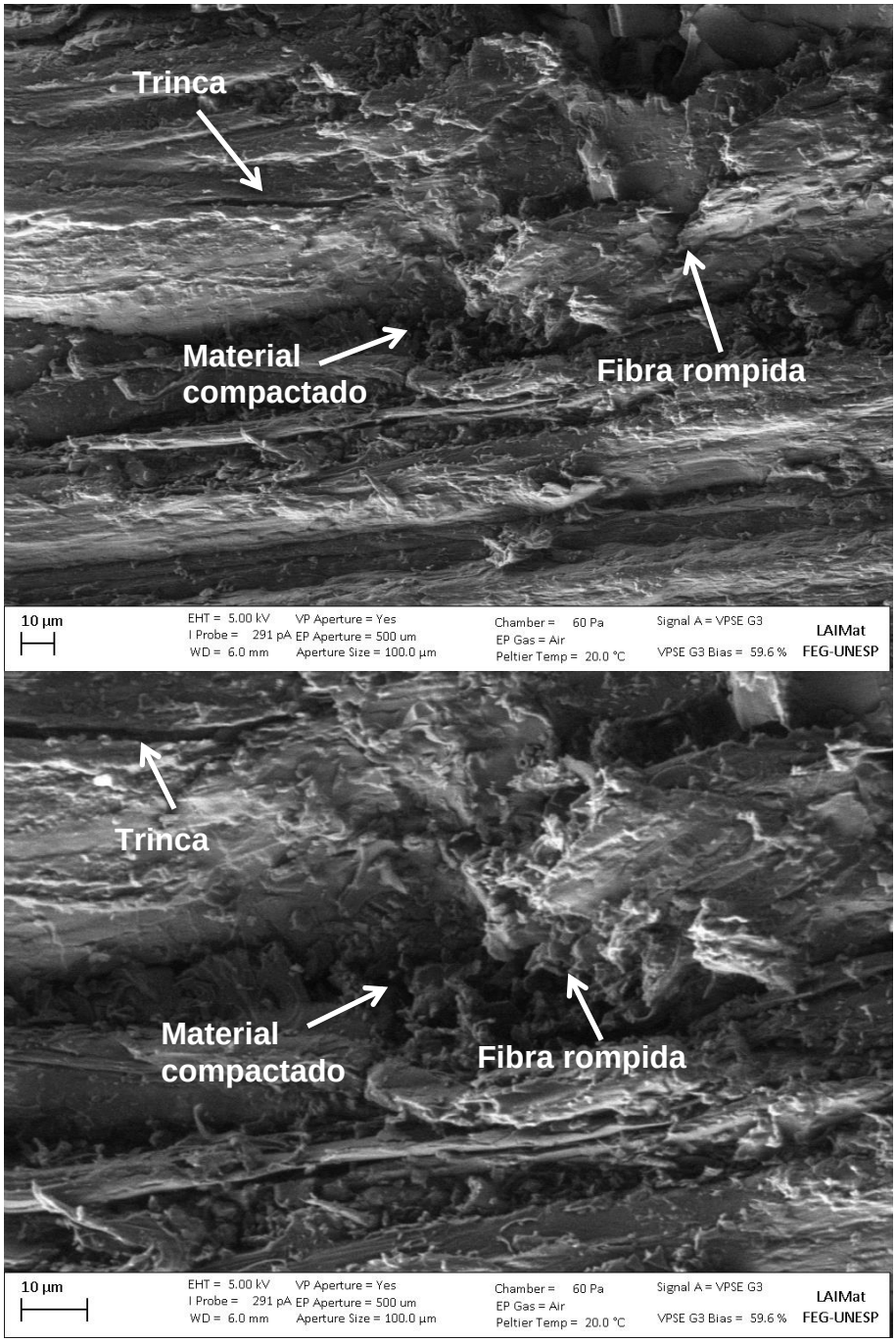
Na Figura 96 são apresentadas as imagens obtidas com a condição mais severa de desgaste. Mais uma vez nota-se uma superfície com bastante material compactado e alguns defeitos gerados pelo processo, também nota-se algumas fibras interrompidas e degradadas. A ampliação de 2000x evidencia os defeitos ocasionados pelo processo e o aparecimento de trincas na superfície da madeira.

Figura 96 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 100 *mesh* com desgaste de 8 minutos.



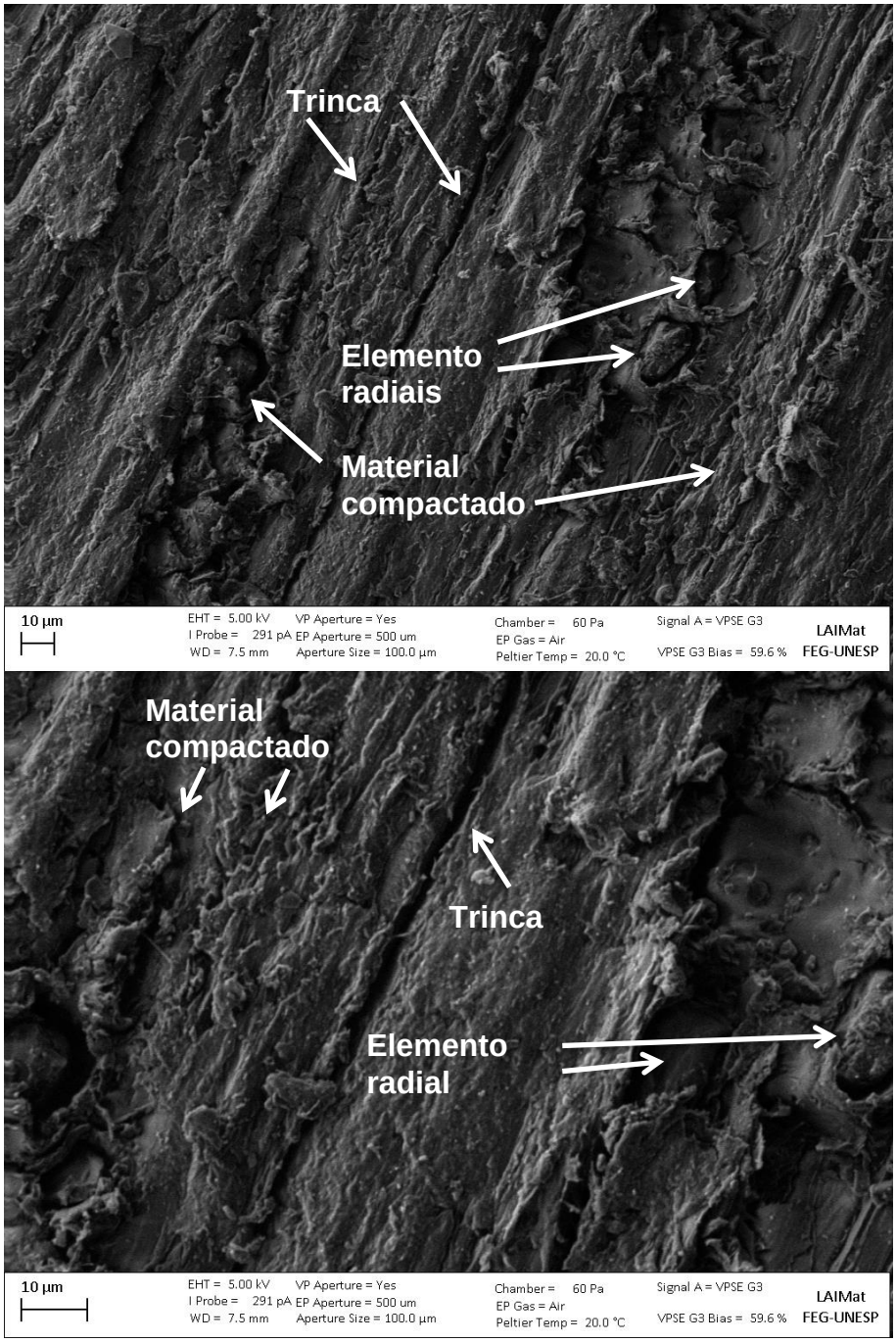
Na Figura 97 é possível notar uma superfície com algumas trincas geradas pelo processo de lixamento, também nota-se algumas fibras rompidas sobre a superfície lixada e um pouco de material compactado. Ao analisar a ampliação de 2000x percebe-se uma fibra rompida e um vale que não apresenta o perfil de uma região lixada. Pode-se notar que há uma maior quantidade de material solto na superfície do que compactado na mesma.

Figura 97 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 120 *mesh* sem desgaste.



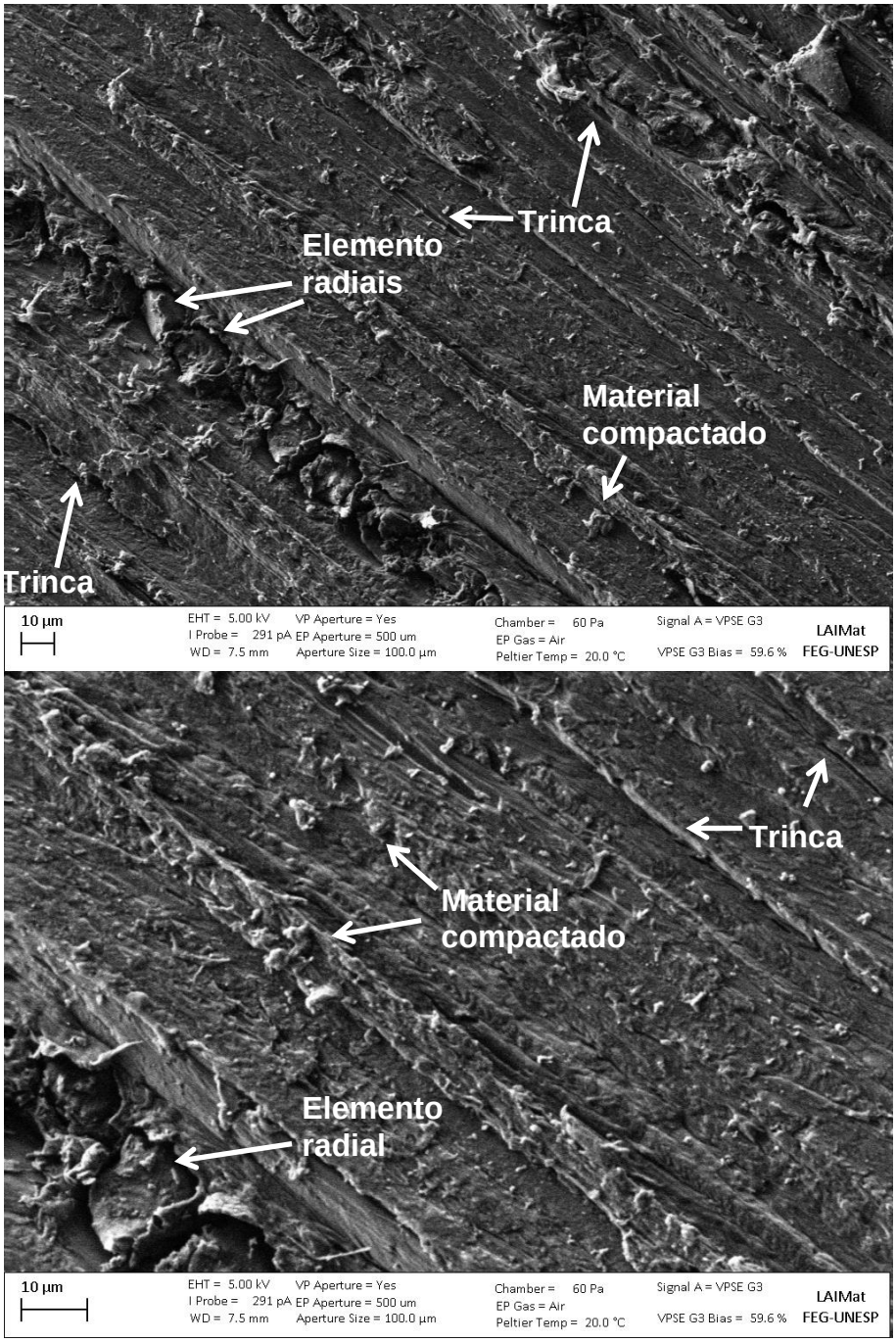
Na Figura 98 é visualizada uma superfície com maior quantidade de material compactado na superfície lixada. Nota-se também uma aparência mais homogênea quando comparada com a mesma granulometria sem o desgaste abrasivo. Também percebe-se a aparição de alguma fibras perpendiculares ao plano de lixamento. Ao analisar a ampliação de 2000x nota-se uma rachadura devido ao processo e o material compactado na superfície.

Figura 98 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 120 *mesh* com desgaste de 4 minutos.



Na Figura 99 novamente volta a ser notado uma superfície homogênea e com material compactado e pouco material solto sobre a superfície lixada. É visível que o processo de lixamento além de remover imperfeições também causa alguns danos a superfície. Nota-se o aparecimento de células perpendiculares ao plano de lixamento. Ao analisar a ampliação de 2000x evidencia-se os danos causados na superfície pelo processo e as fibras perpendiculares.

Figura 99 - MEV do *Corymbia citriodora* lixado com a granulometria 120 *mesh* com desgaste de 8 minutos.



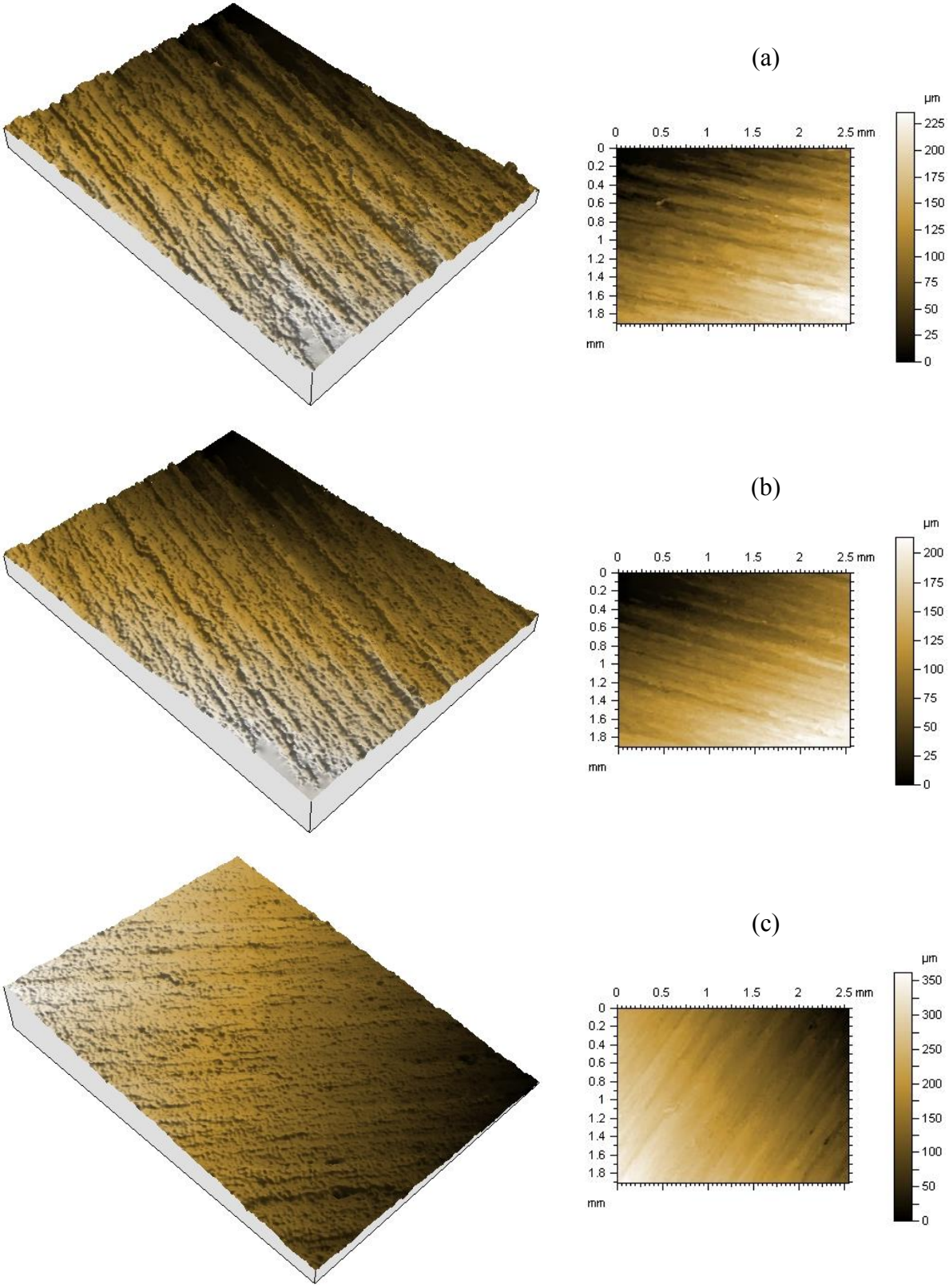
5.6.2. Análise de topografia

Na Figura 100 são mostradas as imagens de topografia obtidas para a granulometria de 80 *mesh* e todas suas condições de desgaste para o *Pinus elliottii*. É possível notar que conforme o desgaste do grão abrasivo vai aumentando, o número de imperfeições ocasionadas pelo processo vai diminuindo e a superfície vai ganhando uma aparência com maior homogeneidade. Também nota-se que a aparência das imagens vai ganhando um tom borrado sobre a superfície, isso se dá pela quantidade de material compactado na sua superfície.

Nas imagens também é possível notar a direção de lixamento utilizada no processo. Quando analisamos apenas a condição sem nenhum desgaste a imagem apresentada é limpa e evidencia os vales e picos causados pelo processo de lixamento. Com a utilização dos grãos que sofreram a primeira condição de desgaste nota-se que esses picos e vales gerados pelo processo ficam menos evidentes, porém ainda são perceptíveis. Já na condição mais severa de desgaste, esses picos e vales quase desaparecem gerando uma imagem com aparência borrada devido a grande quantidade de material compactado na sua superfície.

Para os ensaios de topografia da granulometria de 80 *mesh* e suas condições de desgaste foram gerados os seguintes valores de rugosidade: 44,32 μm para a condição sem desgaste, 41,03 μm para o desgaste de 4 minutos e 61,92 μm para o desgaste de 8 minutos. Nota-se que o único ensaio que obteve um decréscimo do valor da rugosidade foi o com o desgaste de 4 minutos, enquanto o desgaste mais severo gerou um aumento da rugosidade quando comparado às outras duas condições de ensaio.

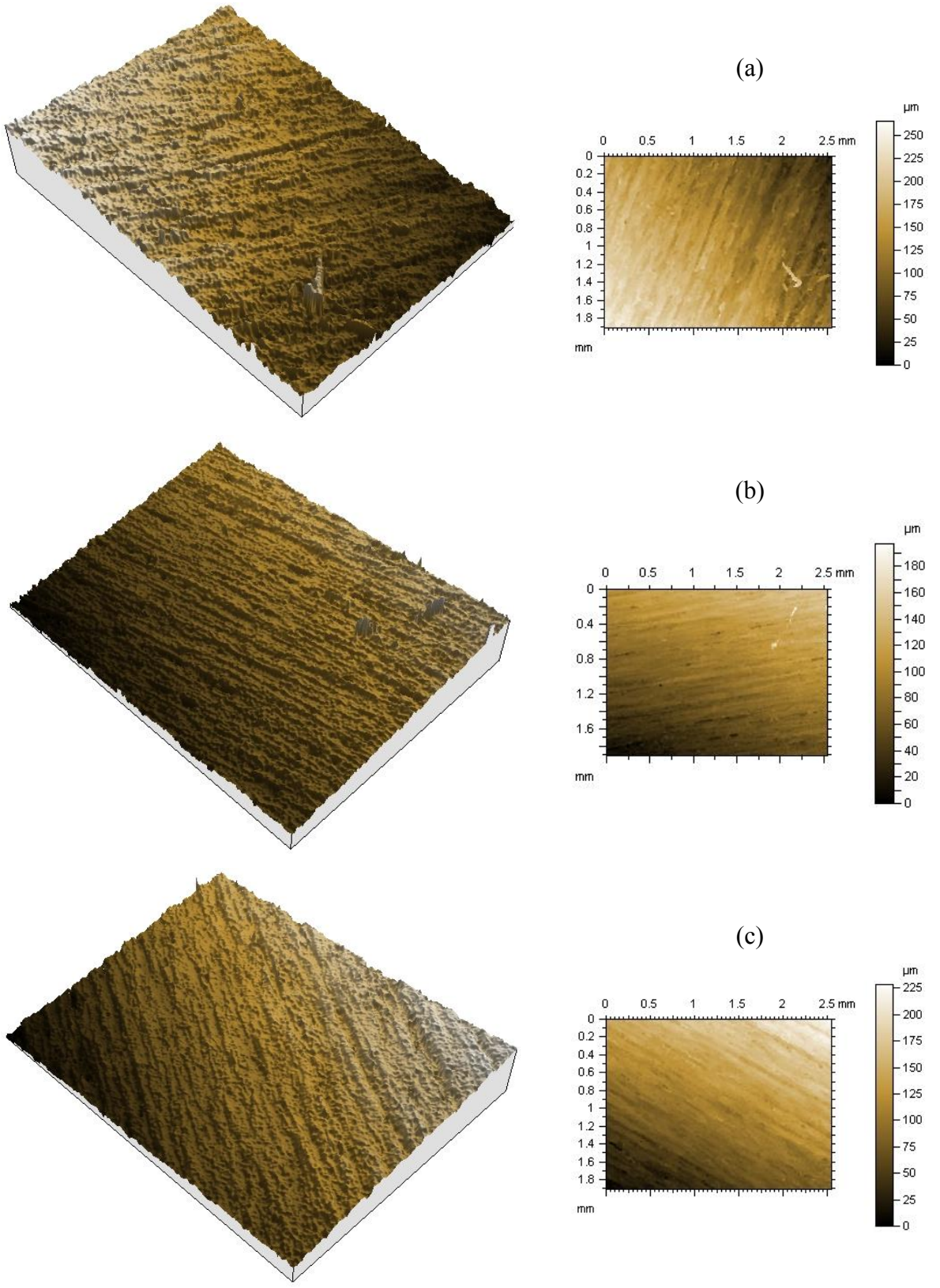
Figura 100 - Topografia do *Pinus elliottii* com a granulometria 80 *mesh* (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste, (c) 8 minutos de desgaste.



Na Figura 101 são apresentadas as imagens de topografia geradas para a granulometria de 100 *mesh* e suas condições de desgaste do grão abrasivo para o *Pinus elliottii*. Diferentemente da granulometria de 80 *mesh* onde o desgaste foi atenuando as marcas dos defeitos de lixamento ocasionado entre a abrasão da lixa e a superfície do material, nesta granulometria pode-se perceber que nas 3 condições de desgaste a direção de lixamento é visível. Quando se analisa a imagem obtida com a lixa sem desgaste do abrasivo são notadas as imperfeições geradas pelo processo de lixamento bem como alguns vales que não apresentam aspecto de uma superfície que tenha passado pelo processo de lixamento; isso também foi observado nas imagens feitas pelo MEV. Analisando-se a condição de 4 minutos de desgaste abrasivo nota-se que a quantidade de ranhuras aumenta sobre a superfície da madeira fazendo com que a mesma tenha um aspecto mais homogêneo quando comparada com a condição anterior, e na última condição de desgaste a imagem gerada apresenta uma quantidade de ranhuras similar a condição de desgaste anterior analisada. Pode-se notar que para ambas as condições de desgaste, 4 e 8 minutos, há uma menor quantidade de vales que não apresentam aspecto típico do processo de lixamento sendo que na condição mediana de desgaste o número destes é menor quando comparada à condição mais severa de desgaste do grão abrasivo.

Os valores de rugosidade obtidos foram: 38,68 μm para a condição sem desgaste abrasivo no grão, 26,17 μm para o grão com 4 minutos de desgaste e 36,02 μm para o grão com 8 minutos de desgaste abrasivo. Nota-se que, assim como a lixa de 80 *mesh*, a condição que gerou o menor valor de rugosidade foi a de 4 minutos de desgaste, porém desta vez o valor gerado pelo ensaio com o desgaste abrasivo mais severo gerou um valor maior que o desgaste anterior, mas inferior à condição do grão sem desgaste abrasivo.

Figura 101 - Topografia do *Pinus elliottii* com a granulometria 100 *mesh* (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste, (c) 8 minutos de desgaste.



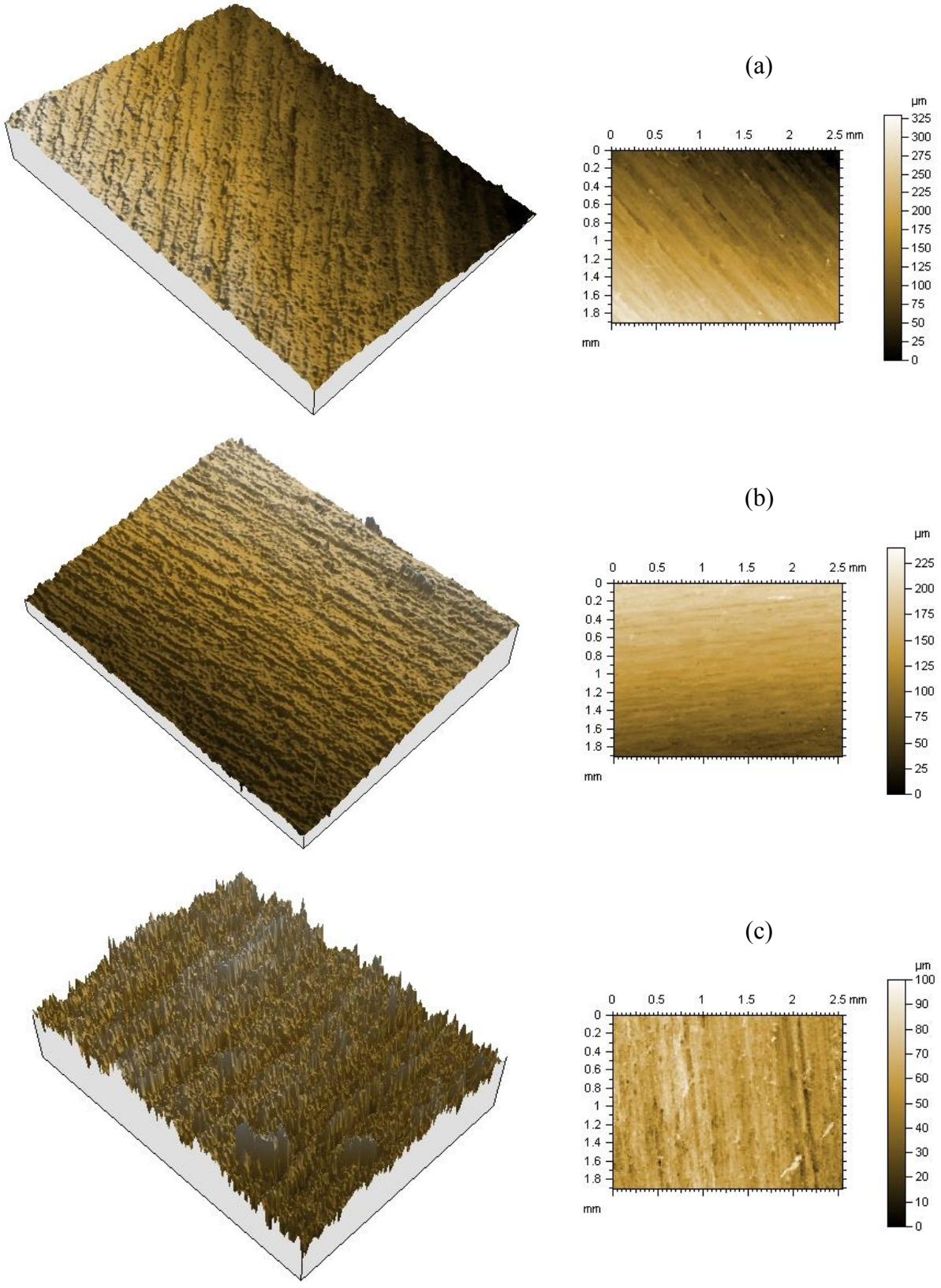
Na Figura 102 são apresentadas as imagens obtidas para a granulometria de 120 *mesh* e suas condições de desgaste. Nota-se que pela primeira vez o desgaste mais severo gerou um perfil diferente dos demais ensaios produzindo uma superfície cheia de picos e vales e sem que seja possível definir a direção de lixamento.

Analisando-se a imagem do grão abrasivo sem desgaste percebe-se a presença de picos e vales gerados pelo processo de lixamento; também é possível notar algumas regiões mais profundas, porém essas apresentam algumas marcas do processo de lixamento. Já na condição de desgaste moderado, 4 minutos, é possível perceber que a superfície possui uma homogeneidade ao longo de sua área. No desgaste mais severo, 8 minutos, não é possível notar um padrão em sua superfície, porém essa condição gerou os menores valores de picos e vales no processo.

Os valores de rugosidade obtidos pelo microscópio para essa granulometria foram: 53,21 μm para o ensaio com o grão abrasivo sem desgaste, 33,56 μm para o ensaio com 4 minutos de desgaste do grão abrasivo e 7,29 μm para a condição com 8 minutos de desgaste. Com a madeira de *Pinus elliottii,* essa foi a única granulometria na qual o desgaste mais severo do grão abrasivo obteve o menor valor de rugosidade. A granulometria de 120 é o grão com menor tamanho ensaiado, consequentemente é o grão mais difícil de fraturar e devido à essa dificuldade o grão acaba gerando micro arestas arredondadas e compactando muito material na superfície, como observado na imagem de MEV para essa condição ensaiada.

Nota-se que, apesar da condição mais severa gerar o menor valor de rugosidade, ela é a que apresenta uma maior quantidade de picos e vales sobre a sua superfície, quando comparada às outras duas condições. O valor de rugosidade média é obtido através da média dos maiores picos e vales que a luz do microscópio atinge sendo assim quanto maior a quantidade de material compactado na superfície melhor.

Figura 102 - Topografia do *Pinus elliottii* com a granulometria 120 *mesh* (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste, (c) 8 minutos de desgaste.

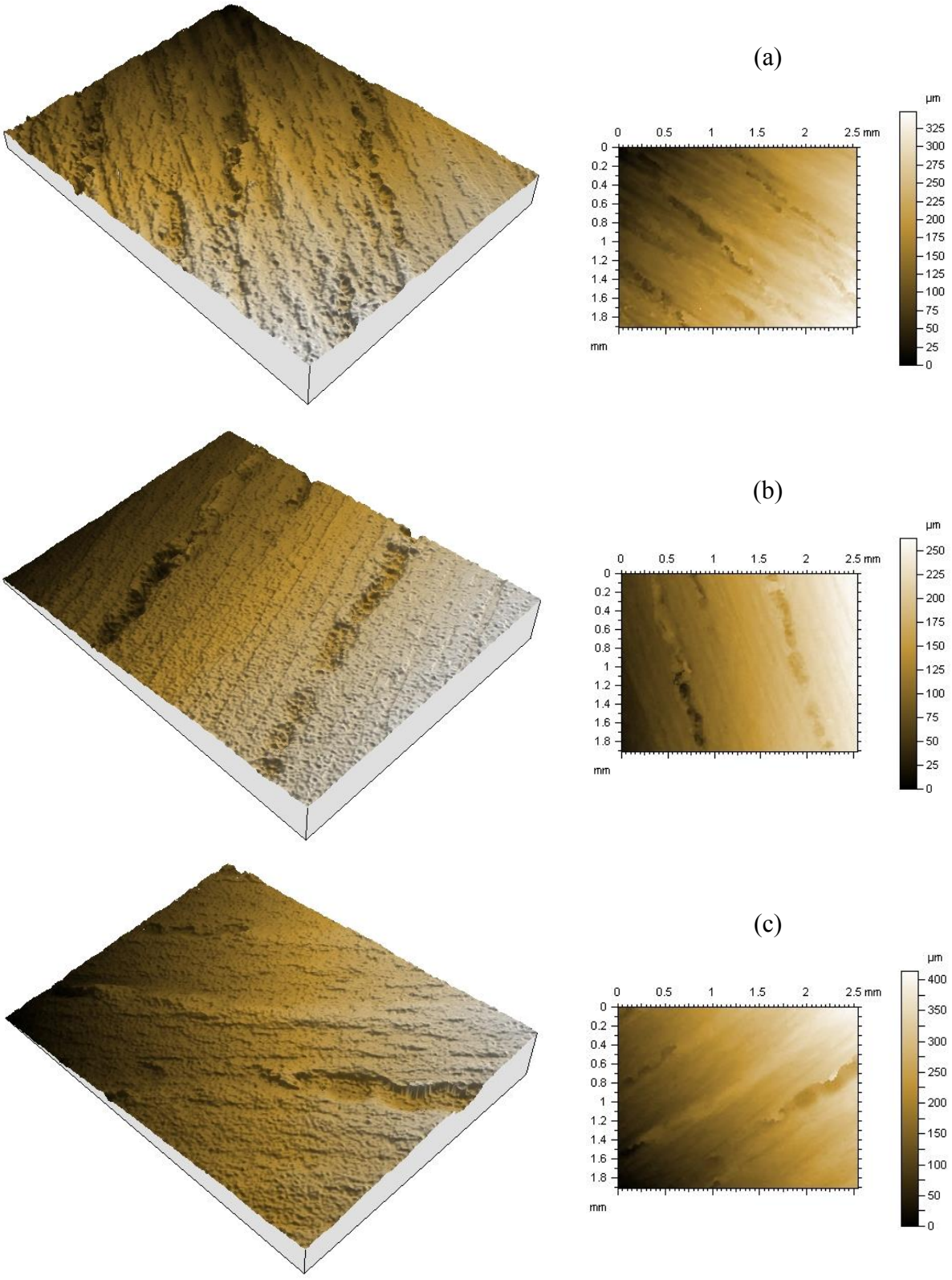


Na Figura 103 são exibidas as imagens geradas para a lixa de granulometria de 80 *mesh* e suas três condições de desgaste abrasivo para a *Corymbia citriodora*. Ao analisar a imagem percebe-se que na condição sem desgaste do grão abrasivo é perceptível a direção de corte e algumas regiões com grandes vales que não apresentam marcas do processo de lixamento. Quando vistos em uma escala maior pode-se notar que esses são elementos da madeira perpendiculares a zona de lixamento e quando se analisa o resultado obtido com 4 minutos de desgaste abrasivo nota-se que é obtida uma melhor qualidade superficial. Porém esses elementos de raio geram vales mais perceptivos e seguindo uma direção e na condição mais severa de desgaste geram uma superfície mais homogênea e com uma minimização desses vales gerados pelos elementos de raio na superfície lixada.

Nota-se que a condição que mais aparece vales profundos é a condição com o desgaste mais agressivo onde a amplitude de profundidade chega próxima de 400 μm e a que obtém a menor amplitude é a condição com 4 minutos de desgaste abrasivo. Os valores de rugosidade média, Ra, obtidos foram: 62,80 μm para a condição sem desgaste abrasivo, 54,50 μm para a condição com 4 minutos de desgaste abrasivo e 71,66 μm para a condição de 8 minutos de desgaste abrasivo.

Assim como no *Pinus elliottii* para a granulometria de 80 *mesh,* a condição de 4 minutos de desgaste foi a que obteve a melhor rugosidade média. Ainda comparando as espécies, os valores obtidos foram menores para o *Pinus elliottii* do que as da *Corymbia citriodora* para a granulometria de 80 *mesh*. Nota-se que diferentemente do *Pinus elliottii,* na *Corymbia citriodora* aparecem vales referentes a elementos radiais presentes em sua estrutura.

Figura 103 - Topografia do *Corymbia citriodora* com a granulometria 80 *mesh* (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste, (c) 8 minutos de desgaste.

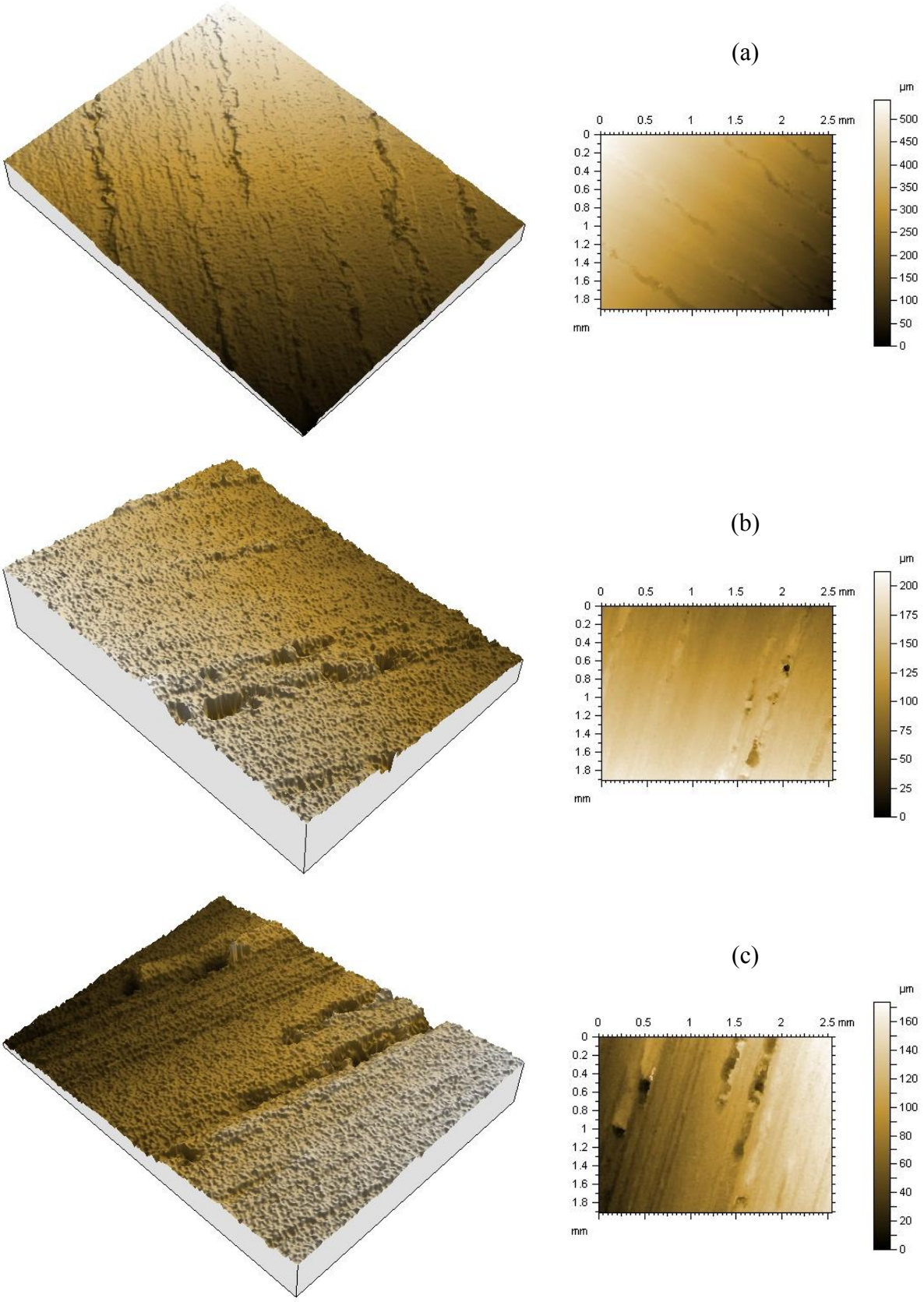


Na Figura 104 são mostradas as imagens obtidas com a granulometria de 100 *mesh* e as condições de desgaste para a *Corymbia citriodora*. É perceptível que para as condições de desgaste a superfície tem um aspecto mais compactado além de possuir vales mais profundos, porém a escala que se encontra ao lado das figuras mostra que as maiores imperfeições foram encontradas na condição sem desgaste do grão abrasivo. Nas imagens geradas nas condições com desgaste abrasivo do grão nota-se que há uma quantidade maior de elementos radiais com material compactado fechando sua abertura.

Traçando um comparativo dessas imagens com as imagens geradas pelo MEV (Figuras 93, 94 e 95) nota-se que nas imagens geradas pela topografia do material pode-se observar melhor o aparecimento dos elementos radiais da *Corymbia citriodora*. Ainda comparando as imagens, nota-se que tanto na imagem obtida com o MEV como na topografia fica claro que a condição sem desgaste apresenta uma maior quantidade de fibras rompidas ao longo da sua superfície enquanto as superfícies geradas com os grãos abrasivos desgastados apresentam uma grande quantidade de material compactado fazendo assim com que os vales tenham sua profundidade diminuída.

Os valores de rugosidade gerados pelas imagens de topografia foram: 88,25 μm para a condição sem desgaste abrasivo, 24,61 μm para o desgaste abrasivo de 4 minutos e 33,22 μm para 8 minutos de desgaste do grão abrasivo. Mais uma vez os valores da *Corymbia citriodora* tiveram a mesma tendência do *Pinus elliottii*, isto é, o menor valor de rugosidade média (Ra) foi obtido com a condição de desgaste mais brando do grão abrasivo. Apesar de esses valores serem muito diferentes dos valores obtidos com o rugosímetro apalpador os resultados possuem uma tendência similar, pois nos valores discutidos anteriormente ambas as condições com desgaste abrasivo se diferenciam significativamente de quando o grão não possui desgaste e são estatisticamente similares.

Figura 104 - Topografia do *Corymbia citriodora* com a granulometria 100 *mesh* (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste, (c) 8 minutos de desgaste.

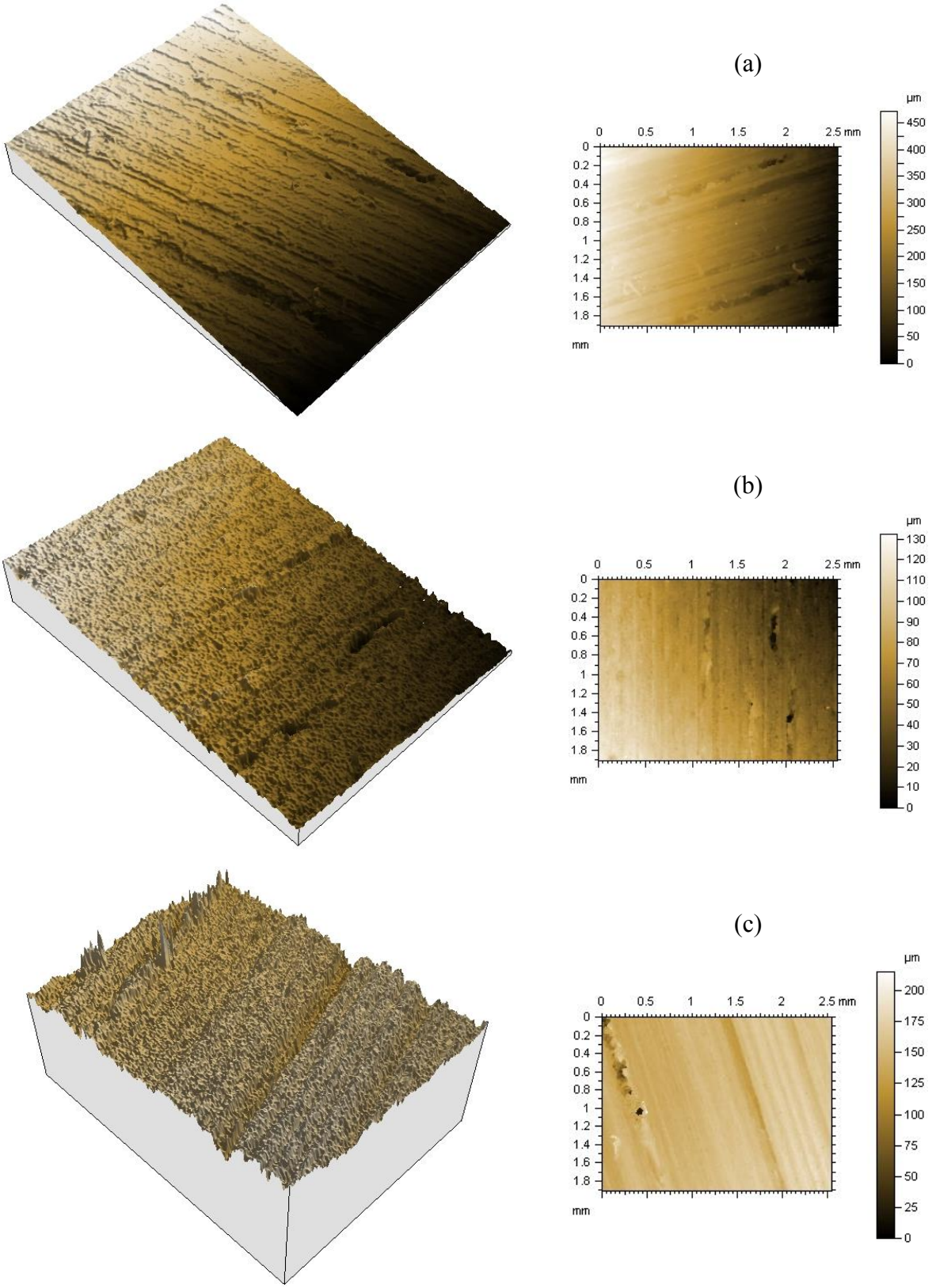


Na Figura 105 são mostradas as imagens de topografia obtidas com a granulometria de 120 *mesh* e suas condições de desgaste. A condição sem desgaste apresenta uma maior quantidade de picos e vales em forma de ranhuras. De acordo com o perfil da amostra ao lado nota-se que há alguns vales cheios de material compactado bem como pequenas aberturas em algumas regiões desses vales. Analisando a imagem com 4 minutos de desgaste abrasivo nota-se que há a aparência de amassado na superfície do material; também se pode notar algumas aberturas que são ser elementos radiais. Analisando a condição de 8 minutos de desgaste abrasivo percebe-se que há uma grande quantidade de vales e picos deixando a aparência da madeira amassada. Como na situação anterior, analisando-se a imagem ao lado da topografia nota-se que há um canal quase fechado completamente com material compactado.

Analisando essas imagens junto com as imagens geradas pelo MEV nas mesmas condições, é possível notar que a granulometria de 120 *mesh* nas duas condições de desgaste foi a única capaz de mostrar elementos radiais em ambas as imagens obtidas. Os valores de rugosidade média (Ra) foram: 104,25 μm para a condição sem desgaste do grão abrasivo, 21,58 μm para a condição com 4 minutos de desgaste do grão abrasivo e 11,04 μm para a condição de 8 minutos de desgaste abrasivo. Mais uma vez o ensaio da *Corymbia citriodora* seguiu a mesma tendência obtida no *Pinus elliottii*.

Também vale a pena ressaltar que o valor de rugosidade média obtido na condição sem desgaste do grão abrasivo foi o maior dentre as 3 granulometrias ensaiadas (80, 100 e 120 *mesh*), por isso é importante ressaltar que nessa condição aparecem algumas regiões que não possuem a característica de uma superfície lixada; isso ocorre devido ao tamanho do grão abrasivo que não é suficientemente grande para penetrar na profundidade total do vale. Este problema é contornado quando há o desgaste abrasivo, pois, há uma compactação do material dentro desses vales fazendo que eles tornem-se menos profundos. Traçando um comparativo com a rugosidade obtida com o apalpador fica óbvio o motivo de tamanho o desvio padrão das rugosidades obtidas devido o perfil de superfície formado; também percebe-se que há uma grande diferença de valores entre o grão abrasivo sem desgaste e as duas condições de desgaste, efeito similar aos valores obtidos com o rugosímetro apalpador.

Figura 105 - Topografia do *Corymbia citriodora* com a granulometria 120 *mesh* (a) sem desgaste, (b) 4 minutos de desgaste, (c) 8 minutos de desgaste.



5.7.COMPARAÇÃO ENTRE AS IMAGENS DE MEV E TOPOGRAFIA

Com a análise das imagens obtidas através do MEV e da topografia pode-se compreender melhor algumas características do processo de lixamento. Quando analisadas as imagens que mostram o ensaio de MEV para o *Pinus elliottii* junto com as imagens que mostram as topografias geradas para as mesmas condições pode-se observar que as irregularidades notadas nas imagens de microscopia geram superfícies com topografia irregulares e conforme o desgaste abrasivo acontece essas superfícies vão compactando maior quantidade de material, e assim preenchendo os espaços vazios sobre a superfície e consequentemente gerando uma topografia menos acidentada.

Quando analisamos as imagens geradas pelo MEV para o *Corymbia citriodora* é possível notar o aumento de material compactado na superfície lixada bem como defeitos gerados pelo processo e defeitos característicos da estrutura do material. Com essas imagens é possível compreender melhor a interação entre abrasivo e peça enquanto que as imagens de topografia são importantes para a visualização da superfície gerada pelo processo de lixamento. Analisando as imagens de MEV foi possível notar micro trincas e material compactado na superfícies lixada, enquanto que na imagens de topografia esses detalhes são omitidos e é possível ter uma melhor percepção do perfil gerado com o processo de lixamento.

6. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos com esse trabalho pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Quanto à influência da granulometria nas variáveis de saída:

Quando avaliada a influência da granulometria, esta teve baixa influência em todas as variáveis aquisitadas (potência de lixamento, emissão acústica e vibração) para todos os abrasivos. A granulometria teve a maior influência na rugosidade quando o lixamento foi realizado com grãos abrasivos de óxido de carbeto de silício no qual os valores de rugosidade se diferenciaram para todas as granulometrias. Já nos outros abrasivos apenas a lixa 80 se diferenciou das demais.

- Quanto à influência do desgaste nas variáveis de saída:

O desgaste abrasivo pouco influenciou na potência de lixamento nos grãos de óxido de alumínio e carbeto de silício quando avaliada a granulometria de 80 mesh. Não houve influência significativa para as demais granulometrias para ambos os abrasivos bem como, não gerou nenhuma influência significativa na potência de lixamento para o óxido de zircônio.

O desgaste abrasivo não influenciou a vibração em nenhum dos casos estudados. Quando se avalia a emissão acústica não há influência significativa para os abrasivos óxido de alumínio e carbeto de silício, e uma leve influência nos grãos de óxido de zircônio, que pode ter ocorrido devido às características da madeira usinada.

O desgaste abrasivo influenciou a rugosidade da mesma forma para todos os tipos de abrasivos a saber, as lixas que não possuíram desgaste sempre se diferenciaram das lixas desgastas, porém o tempo de desgaste gerou valores estatisticamente iguais.

- Qualidade superficial em relação ao grão abrasivo:

Quando comparados os valores de rugosidade dos grãos abrasivos sem desgaste nota-se que para as granulometrias de 80 e 100 *mesh* os menores valores foram obtidos para os grãos abrasivos de óxido de alumínio e o carbeto de silício gerou os menores valores para a granulometria de 120 *mesh*, para ambas as espécies. Os maiores valores foram obtidos com os grãos abrasivos de carbeto de silício para a granulometria de 120 *mesh* para o *Pinus elliottii* e,

para as demais variações de granulometria e espécie, quem obteve os maiores valores de rugosidade foram os grãos abrasivos de óxido de zircônio.

- Quanto às imagens de topografia e microscopia eletrônica de varredura:

As imagens de microscopia eletrônica de varredura foram importantes para compreender a interação entre o grão abrasivo e a peça. Foi possível perceber que há uma maior quantidade de marcas de lixamento nas condições sem desgaste abrasivo, enquanto que quando o desgaste abrasivo é realizado nota-se que há um aumento da quantidade de material compactado dentro das imperfeições da madeira e das imperfeições geradas pelo processo de lixamento bem como uma homogeneização da mesma.

As imagens de topografia foram importantes para poder entender melhor o perfil gerado no lixamento em uma escala macro, onde é possível perceber as imperfeições geradas pelo processo e zonas que não apresentam marcas dos grãos abrasivos. O ensaio de topografia também mediu a rugosidade média e os valores foram muito superiores aos medidos com o rugosímetro com apalpador devido à rugosidade ser medida através da emissão de luz do microscópio.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com intuito de aprimoramento do tema discutido nesse trabalho e para que haja uma continuidade nas pesquisas desse tipo de material faz-se necessário as seguintes sugestões para o processo de lixamento plano de madeiras:

- Verificar o comportamento do lixamento plano utilizando uma maior variação de granulometria para as lixas utilizadas;
- Verificar a influência do uso sequencial de granulometrias a fim de traçar uma sequencia para se obter a melhor qualidade superficial;
- Analisar o sinal obtido ao longo do tempo a fim de se identificar o momento onde as variáveis aquisitadas ficam estáveis;
- Variar as pressões utilizadas para uma melhor compreensão dessa variável no processo de lixamento plano;
- Variar as espessuras de corte a fim de se otimizar a quantidade ideal a ser removida da superfície.
- Verificar o comportamento outras espécies de madeira e painéis a base de madeira durante o processo de lixamento plano.

REFERÊNCIAS

AGROTROPICAL INSUMOS AGRÍCOLAS LTDA.. **A escolha do Eucalipto:** A escolha do eucalipto está relacionada a algumas vantagens da espécie: crescimento, objetivo e local. Disponível em: <http://www.agrotropical.org/escolhadoeucalipto.html>. Acesso em: 02 fev. 2014.

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

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 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

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

ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013:** ano base 2012 / ABRAF. Brasília: 2013.

AGUILERA, A.; MARTIN, P. Machining qualification of solid wood of *Fagus silvatica* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness. **Holz als Roh – und Werkstoff**, v.59, n.6, p.483-488, 2001.

ALVES, M. C. S., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., CATAI, R. E. **Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho**. REM - Revista Escola de Minas. , v.62, 2009

ASLAN, S.; COSKUN, H; KILIÇ, M. The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (Cedrus Libani A. Rich.) woods. **Building And Environment**, EUA, p. 696-701. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 07190:** Projeto de estruturas de madeira. 107p. Rio de Janeiro, 1997.

ATKINS, T. **The Science and Engineering of Cutting**: The Mechanics and Processes of Separating, Scratching and Puncturing Biomaterials, Metals and Non-Metals. Oxford: Butterworth Heinemann, 2009.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **Série Divulgação/ Prodepef**, Brasília, n.13, 145p., 1976.

BIANCHI, C. E.; SILVA, E. J.; LOVATO, M. C.; FERNANDES, O. C.; VALARELLI, I. D. **Características e tendências do processo de abrasão.** Máquinas e Metais, Aranda Editora, ano 35, n. 399, p. 238-249. abr. 1999.

BUDAKCI, M.; GURLEYEN, L.; CINAR, H.; KORKUT, S. Effect of wood finishing and planning on surface smoothness of finished wood. **Journal of Applied Sciences**, v.7, n.16, p.2300-2306, 2007.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira.** Nobel. S,,o Paulo, 154p. 1991.

CRUZ, C. R. **Caracterização da madeira de clones de Eucalyptus para a utilização na industria madeireira**. Curitiba, 2000. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

DUNDAR, T; AKBULUT, T; KORKUT, S. **The effects of some manufacturing factors on surface roughness of sliced Makore´ (Tieghemella heckeliiPierre Ex A.Chev.) and rotary-cut beech (Fagus orientalisL.) Veneers.** Building And Environment, n. , p.469-474, 2008.

FERREIRA, O. P. (Org.). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Secretaria do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo: Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, 2003.

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, 2008.

FORESTRY COMPENDIUM (Comp.); **Pines of Silvicultural Importannce**. New York: Cabi Publishing, 2002.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p. 1999.

GOLÇALVES, F. B.; SASAKI, M. Y.; SALOMÃO, R. **Novos desafios e oportunidades nos processos de abrasão por lixamento.** Trabalho apresentado à 6ª edição da Feira e Congresso Usinagem, São Paulo, 2010.

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

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 755–761, 2003.

HENDARTO, B.; SHAYAN, E.; OZARSKA, B. **Characterisation of Surface Finishing Processes in Wood Furniture Manufacturing.** Disponível em: <http://www.swinburne.edu.au/engineering/iris/pdf/profiles/BennyHendarto.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2014.

INSTITUTO DE ESTUDOS E PESQUISAS FLORESTAIS. Corymbia citriodora Hill & Johnson (EucalyptuscitriodoraHook). Disponível em: < http://www.ipef.br/identificacao/cief/especies/citriodora.asp>. Acesso em: 04 fev. 2014.

JAVOREK, L.; HRIC, J.; VACEK, V. The Study of Chosen Parameters During Sanding of Spruce and Beech Wood. **ProLigno**, v.2, n.4, p.15-24, 2006.

HAWKS, L. K. **Wood Finishing and Refinishing**: Sanding. 1995. Disponível em: <http://extension.usu.edu/files/publications/publication/HI_26.pdf>. Acesso em: 14 out. 2013.

KARINKANTA, P.; ILLIKAINEN, M.; NIINIMÄKI, J. The effect of anisotropicity of Norway spruce (*Picea abies*) during two-body abrasion. **Wear**, n. 272, p.38-42, 2011.

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

KIM, H. Y.; KIM, S. R.; AHN, J. H.; KIM, S. H. **Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission.** Journal of Materials Processing Techonology, nº 111, p. 273-278, 2001.

KOPAC, J.; SALI, S.. Wood: an important material in manufacturing technology. **Journal Of Materials Processing Technology**, 134-142 p. 2003.

LEMOS, A. L. F.; GARCIA, R. A.; LOPES , J. O.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. **Madeira de Corymbia citriodora (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson sob Aspectos Físicos e Anatômicos como Fatores Qualitativos.** Floresta e Ambiente.v.19, n.1, p.1-8,2012.

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, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

LOUPPE, D., OTENG-AMOAKO, A.A. & BRINK, M. (EDITORS);**Plant Resources of Tropical Africa** 7(1). Timbers 1.PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands / Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands/ CTA, Wageningen, Netherlands.704 pp. 2008.

MAGOSS, E. General Regularities of Wood Surface Roughness. **Acta Silvatica & Lingaria Hungarica**. v.4, p.81-93, 2008.

MAHR (Germany). **Perthometer**: Surface Texture Parameters. Disponível em: <http://www.universalmeasurement.com/MahrFederalFinish.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2014.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura. Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens.** Apostila. 98p. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

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

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. EUA: Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I.. **Tribology of abrasive machining processes.** EUA: William Andrew, Inc., 2004.

MEASUREMENT COMPUTING CORPORATION (Org.). **Data acquisition handbook**. 3. ed. Estados Unidos da América. 2012.

MOREIRA, F. C. **Aplicações de sistemas de monitoramento e supervisão de processos**. 2007. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2007.

MOURA, M. C. **Variações em características de crescimento e da madeira em clones de Eucalyptus.** Lavras, 2000. 63f. Dissertação (Mestrado em Produção Florestal) - Universidade Federal de Lavras.

NAGATANI, T.; SAITO, S.; SATO, M.; YAMADA, M. **Development of an Ultra High Resolution Scanning Electron Microscope by Means of a Field Emission Source and in-Lens System.** Scanning Microscopy, v.1, n.3, 1987.

NAGYSZALANCY, S. **The wood sanding book: A guide to abrasives, machines, and methods.** Tauton Press, New York, 1997. 213p.

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

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.

PRASAD, B. S.; SARCAR, M. M. M. Measurement of Cutting Tool Condition by Surface Texture Analysis Based on Image Amplitude Parameters of Machined Surfaces-an Experimental Approach. **Journal of Metrology Society of India**, Metrology Society of India. v.23, n.1, p.39-54, 2008.

REDDY, T. S.; REDDY, C. E. Real Time Monitoring of Surface Roughness by Acoustic Emission in CNC Turning. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, Kavala Institute of Technology. n.3, v.1, p.111-115, 2010.

SAMOLEJ, A.; BARCIK, S. Influence of Specific Pressure on Cutting Power and Wood Removal by Disc Sander. **Drvna Industrija**. v.57, n.1, p.5-11, 2006.

SALJÉ O. E.; PAULMANN R.; Relations Between Abrasive Processes, **CIRP Annals** - Manufacturing Technology, Volume 37, Issue 2, Pages 641-648, 1988.

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, 2005.

SALONI, D. E.; LEMASTER, R. L.; JACKSON, S. D. Process Monitoring Evaluation and Implementation for the Wood Abrasive Machining Process. **Sensors.Basel**, v.10, n.11, p.10401-10412, nov., 2010.

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) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Unesp, Guaratinguetá, 2011.

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.

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

SEQUEIRA, C. **Sensores para medições de vibrações mecânicas - Acelerômetros**. Revista Manutenção. v. 116. Portugal. 2013

SERPA, P. N.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PIMENTA, A. S. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii***. Revista Árvore, v.27, n.5, p.723-733, 2003.

SERVIDONI, A. P. S. **Análise de porosidade e o potencial como rocha reservatório em estromatólito do recente da lagoa salgada, Litoral Fluminense - RJ.** 141f. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória), Programa de Pós-graduação em ciências da terra - UFPr. 2012.

SHIMIZU, J. Y. Cultivo do Pinus, **Sistemas de Produção**, n. 5, Embrapa Florestas, 2005.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 160f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais - Tecnologia e utilização de produtos florestais) - Faculdade de Engenharia Florestal, UFPr, Curitiba, 2002.

SULAIMAN, O.; HASHIM, R.; SUBARI, K.; LIANG, C. K.. Effect of sanding on surface roughness of rubberwood. **Journal Of Materials Processing Technology**, 3949-3955 p., 2009.

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

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

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.

VARASQUIM, F. M. F. A. **Análise da Influência da Velocidade de Corte, da Granulometria da Lixa e da Pressão Específica de Corte no Processo de Lixamento do *Eucalyptus grandis.*** 2009. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista do Campus de Itapeva, 2009.

VARASQUIM, F. M. F. A.; ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T. T.; SANTIAGO, L. F. F.; SOUZA, A. J. D. **Influence of belt speed, grit sizes and pressure on the sanding of *Eucalyptus grandis* wood.** Cerne, v. 18, nº2, 231 - 237p. 2012.

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

WARREN, A. W.; GUO, Y. B.. **Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces.** International Journal Of Fatigue, USA, v. 29. p.603-614, 2007.

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-GRUPO SAINT GOBAIN. **Retificação. Apostila de treinamento da Empresa Winter**, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.

WOLKENHAUER, A.; AVRAMIDIS, G.; HAUSWALD, E.; MILITZ, H.; VIÖL, W. Sanding vs. plasma treatment of aged wood: A comparison with respect to surface energy, **International Journal of Adhesion and Adhesives**. p. 18-22, 2009.