



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
ENGENHARIA MECÂNICA
CAMPUS DE BAURU

SUELI SOUZA LEITE

**INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO PROCESSO DE
LIXAMENTO EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DO
ACABAMENTO SUPERFICIAL DO *Corymbia citriodora* &
Pinus elliottii.**

BAURU

2019

SUELI SOUZA LEITE

**INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO PROCESSO DE
LIXAMENTO EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DO
ACABAMENTO SUPERFICIAL DO *Corymbia citriodora* &
Pinus elliottii .**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista,
para a obtenção do título de Doutora em Engenharia
Mecânica na área de processos de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ivaldo De Domenico Valarelli

Coorientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de S. Alves

Bauru - SP
2019

L533i

Leite, Sueli Souza

Investigação analítica do processo de lixamento em relação às características do acabamento superficial do *Corymbia citriodora* & *Pinus elliottii* . / Sueli Souza Leite. -- Bauru, 2019

131 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Ivaldo de Domenico Valarelli

Coorientador: Manoel Cléber de Sampaio Alves

1. Lixamento da Madeira. 2. Rugosidade Superficial da Madeira. 3.
Tratamento Térmico. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE SUELI SOUZA LEITE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 13 dias do mês de setembro do ano de 2019, às 13:30 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Professor Associado JOAO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS do(a) Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONCALVES do(a) Departamento de Engenharia Industrial Madeireira / Campus Experimental de Itapeva - UNESP, Prof. Dr. MARCUS ANTONIO PEREIRA BUENO do(a) -, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de SUELI SOUZA LEITE, intitulada **INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE LIXAMENTO E TERMORRETIFICAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS SUPERFICIAIS DO CORYMBIA CITRIODORA & PINUS ELLIOTII**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: _ _ _ _

APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Professor Associado JOAO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONCALVES

Prof. Dr. MARCUS ANTONIO PEREIRA BUENO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

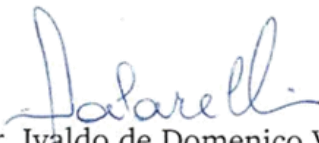
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: SUELI SOUZA LEITE

DE: "INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE LIXAMENTO E TERMORRETIFICAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS SUPERFICIAIS DO CORYMBIA CITRIODORA & PINUS ELLIOTII"

PARA:

INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO PRO-
CESSO DE LIXAMENTO EM RELAÇÃO ÀS
CARACTERÍSTICAS DO ACABAMENTO SUPER-
FICIAL DO CORYMBIA CITRIODORA & PINUS
ELLIOTTII

Bauru, 13 de setembro de 2019



Prof. Dr. Ivaldo de Domenico Valarelli
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por se fazer presente em todas as etapas da minha vida, dando-me sustento, amor, paz, fé, perdão, inteligência e o mundo, dádivas constantes e infindas, fazendo-me capaz de viver melhor e de alargar as minhas fronteiras conquistando e construindo relações, caminhos e trabalhos. Sou-Lhe também, imensamente grata pelas pessoas que encontrei, algumas me acompanham desde os meus primeiros passos, como meus pais, os quais me ensinaram com palavras e atitudes, virtudes e conceitos valorosos, sendo os meus primeiros mentores instruindo-me para vida. Por meio deste casal, pude sentir o amor vital e único, como os clássicos, insubstituíveis e que nunca perdem seu valor com o passar do tempo, pelo contrário tornam-se raros, relíquias. Agradeço, pelo o amor paterno e materno se fundirem e me doar o amor fraterno, meu irmão elo construído geneticamente, fisicamente e sentimentalmente e que jamais será rompido, mesmo com o tempo ou distância. Enfim, obrigada pai (*Expedito Nascimento Leite*), mãe (*Jacira Souza da Silva Leite*) e irmão (*Robson Souza Leite*) pelo privilégio de compartilhar a minha vida com vocês e pelo apoio incondicional em ajudar-me em todos os aspectos da minha vida. Agradeço porque conheci pessoas que deixaram a caminhada mais alegre, divertida, leve, tornando o percurso inesquecível, grata por ter *Amigos* em especial *Gessica Mina Kim Jesus* que me ajudou na elaboração de artigos e na etapa de qualificação e a *Família Cosmo*, em especial *Denise Cosmo de Souza* que considero a irmã que Deus me deu para compartilhar a jornada da vida e seus pais *Lindinalva* e *Ivanildo*, os quais me acolheram com muita gentileza e afeto em sua casa, ajudando-me em cada etapa acadêmica. Agradeço por encontrar os *professores* : *Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves* , *Dr. Ivaldo De Domenico Valarelli* e *Dr.^a Gladys Dorotea Cacsire Barriga* pessoas especiais sempre dispostas e solícitas, que me incentivam a pesquisar e estudar, proporcionando o meu progresso acadêmico. Além disto, agradeço à UNESP pelo apoio à pesquisa e aos pesquisadores citados neste trabalho que contribuíram com seus estudos e pesquisas para o desenvolvimento do mesmo.

RESUMO

As madeiras tratadas termicamente podem ser processadas, coladas ou pintadas, sendo empregadas na confecção de diversos produtos como: *decks*, esquadrias, armários internos, painéis decorativos, pisos, móveis dentre outros, que necessitam muitas vezes em seu processo de fabricação passar pelo lixamento. Tal processo consiste em adequar as dimensões desejadas da peça e proporcionar o seu acabamento superficial, padrão fundamental para qualidade do produto que afeta tanto a questão estética quanto na aplicação de revestimentos. No entanto, o lixamento é oneroso por ser realizado empiricamente nas indústrias, sem padronização. Sabendo-se disto, foi realizado uma investigação estatística do processo de lixamento da madeira aplicando dois métodos experimentais, fatorial completo e de Taguchi, afim de analisar o comportamento da rugosidade média e dos parâmetros de controle do processo potência e vibração. Para obtenção dos dados utilizou um sistema de monitoramento composto por uma lixadeira plana com circuito pneumático, no qual variou os fatores espécie de madeira *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, granulometria das lixas de óxido de alumínio de 100, 120, 150 e 220 *mesh* e o gradiente de temperatura do tratamento térmico das madeiras de 80, 120, 160 e 200°C, incluindo também no processo madeiras sem tratamento térmico de ambas as espécies mencionadas. Os dados foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância - ANOVA, teste de comparações múltiplas de Tukey com 95% de confiabilidade e regressão múltipla utilizando o software R® e Minitab 18®. Após a análise, pode-se concluir que o *Pinus elliottii* não tem relação significativa com a granulometria da lixa e temperatura de termorretificação, e ambas as madeiras sem tratamento térmico não tem relação significativa com a granulometria das lixas. Dentre os métodos aplicados o experimental fatorial completo apresentou maior precisão tornando-se mais explicativo, porém sendo recomendado o método de Taguchi para analisar o processo de lixamento de forma prévia possibilitando selecionar as variáveis de análise com maior intensidade de relação com os parâmetros investigados, arranjando o planejamento experimental fatorial completo com maior assertividade.

Palavras-chave : Lixamento da Madeira, Rugosidade Superficial da Madeira, Tratamento Térmico.

ABSTRACT

The heat treated woods can be processed, glued or painted, being used in the manufacture of various products such as decking, frames, interior cabinets, decorative panels, floors, furniture and others, which often require in their manufacturing process to go through sanding. This process consists in adjusting the desired dimensions of the part and providing its surface finish, a fundamental standard for product quality that affects both the aesthetic issue and the application of coatings. However, sanding is costly because it is performed empirically in industries without standardization. Knowing this, a statistical investigation of the wood sanding process was carried out applying two experimental methods, complete factorial and Taguchi, in order to analyze the average roughness behavior and the control parameters of the power and vibration process. To obtain the data we used a monitoring system consisting of a flat sander with pneumatic circuit, which varied the species *Corymbia citriodora* and *Pinus elliottii*, the size of the 100, 120, 150 and 220 mesh aluminum oxide sandpaper and temperature gradient of the wood heat treatment of 80,120,160 and 200°C, also including in the process wood without heat treatment of both species. Data were statistically analyzed by analysis of variance - ANOVA, Tukey's multiple comparisons test with 95% reliability and multiple regression using the R® and Minitab 18 ® software. After the analysis, it can be concluded that *Pinus elliotti* has no significant relation with the sandpaper granulometry and thermorectification temperature, and both woods without heat treatment have no significant relation with the sandpaper granulometry. Among the applied methods the complete factorial experimental presented greater precision becoming more explanatory, however being recommended Taguchi method to analyze the sanding process in advance allowing to select the analysis variables with greater relation with the investigated parameters, arranging the complete factorial experimental design with greater assertiveness.

Keywords: Wood Sanding Process; Surface Roughness of Wood, Heat Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da cadeia produtiva simplificada da transformação da madeira serrada com foco nas etapas responsáveis pelas características superficiais do produto.	3
Figura 2 - Esquema ilustrativo das variáveis analisadas na pesquisa para obter informações sobre o comportamento da potência, vibração e rugosidade superficial do <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Pinus elliottii</i> no lixamento quando processados termorretificados e não termorretificados (NT).....	4
Figura 3 - Sequência organizacional da estrutura da madeira envolvendo a macro e micro estrutura e os constituintes poliméricos.....	8
Figura 4 - Esquema da estrutura anatômicas das madeiras <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Pinus elliottii</i>	9
Figura 5 - (A) Diagrama esquemático para ilustrar a estrutura geral da parede celular da madeira (B) Direções estruturais das seções da madeira.....	12
Figura 6 - (A) Esquema da formação estrutural da parede celular da madeira (B) Região cristalina e amórfica da celulose.....	16
Figura 7 - Constituição da estrutura da lixa	28
Figura 8 - Etapas do processo do lixamento.....	29
Figura 9 -Comportamento do grão abrasivo da lixa no decorrer do processo de lixamento	30
Figura 10 - Comportamento da lixa no processo de lixamento.....	31
Figura 11 -comportamento dos grãos abrasivos usados no processo de lixamento com suas principais características.....	33
Figura 12 -Esquema da classificação mesh para os grãos abrasivos.....	34
Figura 13 -Perfil do percurso da medição da Rugosidade média (Ra) em uma superfície.	39
Figura 14 - Comprimento para avaliação da rugosidade (NBR 6405/1988).....	40
Figura 15 - Esquema dos componentes da estrutura do banco de ensaios onde realizou os testes de lixamento.	48
Figura 16 - Esquema das combinações dos níveis dos fatores selecionados para análise do processo experimental de lixamento.....	51
Figura 17 - Processo de medição da rugosidade.	52
Figura 18 - Gráfico de dispersão marginal realizada com os dados da matriz L ₄₀	57

Figura 19 - Gráfico de interação entre os fatores madeira e granulometria formados com a matriz L_{32}	62
Figura 20 - Gráfico de Interação da rugosidade média R_a (μm) entre os fatores madeira e temperatura com a matriz de dados L_{32}	64
Figura 21 - Gráfico de Interação da rugosidade média R_a (μm) entre os fatores madeira e temperatura com a matriz de dados L_{16} formada com aplicação do método de Taguchi.	66
Figura 22 - Gráfico de interação do <i>C.citriodora</i> obtidos pela matriz L_{16} do experimento fatorial completo.....	70
Figura 23 - Gráfico de efeitos principais do comportamento da rugosidade $R_a(\mu m)$ em relação aos fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação da matriz L_{32} , obtida pelo experimento fatorial completo.....	72
Figura 24 - Gráfico de efeitos principais do comportamento da rugosidade $R_a(\mu m)$ em relação aos fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação da matriz L_{16} , obtida pelo método de Taguchi	73
Figura 25 -Gráfico de efeitos principais com aplicação do sinal -ruído (S/N) menor melhor do comportamento da rugosidade $R_a(\mu m)$ em relação aos fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação da matriz L_{16} , obtida pelo método de Taguchi	73
Figura 26 - Gráfico de contorno com dispersão dos dados da rugosidade média $R_a(\mu m)$	76
Figura 27 - Gráfico de dispersão marginal realizada com os dados da matriz L_{40} relacionando rugosidade média $R_a(\mu m)$ e potência (W).....	80
Figura 28 - Gráfico de superfície 3D da matriz de dados L_{40} relacionando as rugosidades média $R_a(\mu m)$ e máxima com a potência (W).....	80
Figura 29 - Gráfico de interação entre os fatores temperatura de termorretificação e espécies de madeira em relação ao comportamento da potência (W)	85
Figura 30 - Gráfico de interação entre os fatores temperatura de termorretificação e espécies de madeira em relação ao comportamento da potência (W)	87
Figura 31 - Gráfico de barras relacionando os fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação da madeira no comportamento da potência (W).	88
Figura 32 - Gráfico de efeitos principais para o <i>C.citriodora</i> e <i>P.elliotti</i>	90

Figura 33 - Gráfico de interação entre os fatores granulometria e madeira não termorretificadas <i>C.citriodora</i> e <i>P. elliotti</i> em relação ao comportamento da potência (W) dissipada no processo de lixamento.	94
Figura 34 - Gráfico de dispersão da matriz completa L_{40} relacionando os fatores rugosidade média e vibração (m/s^2) no processo de lixamento.	99
Figura 35 - Gráfico de superfície 3D da matriz completa L_{40} em relação as rugosidades média e máxima com a vibração (m/s^2) no processo de lixamento.	99
Figura 36 - Gráfico de interação entre os fatores granulometria da lixa e espécie de madeira em relação ao comportamento da vibração (m/s^2).....	101
Figura 37 - Aspecto visual das madeiras <i>C.citriodora</i> a e <i>Pinus elliottii</i> modificada termicamente.	105
Figura 38 - Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do <i>Corymbia citriodora</i> termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh 500x BSD.	107
Figura 39 - Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do <i>Corymbia citriodora</i> termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh 100x BSD.	108
Figura 40 - Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do <i>Pinus elliottii</i> termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh.	110
Figura 41 -Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do <i>Pinus elliottii</i> termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Alterações físico-químicas provocadas termicamente na madeira.....	23
Tabela 2- Caracterização química da madeira <i>Corymbia citriodora</i> tratada termicamente com os valores médios percentuais dos componentes poliméricos juntamente como desvio padrão	26
Tabela 3- Esquema da classificação mesh para os grãos abrasivos.....	35
Tabela 4 - Tabela de comprimento de amostragem (“cut- off”).....	41
Tabela 5- Características técnicas da lixadeira plana, transdutor de corrente e bloco de conector.	50
Tabela 6 - Fatores e níveis estipulados para análise do processo de lixamento	50
Tabela 7- (PARTE I): Valores descritivos do Ra (μm) em relação a todas às condições de ensaio obtidos como experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do <i>Corymbia citriodora</i>	54
Tabela 8- (PARTE II) :Continuação dos valores descritivos do Ra (μm) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do <i>Pinus elliptii</i>	55
Tabela 9- Valores descritivos da rugosidade das madeiras termorretificadas Ra(μm) em relação às condições de ensaio proposta pela metodologia Taguchi formando uma matriz ortogonal L_{16}	56
Tabela 10- ANOVA com a matriz L_{32} , experimento fatorial completo com as madeiras termorretificadas	58
Tabela 11- ANOVA com a matriz L_{16} , metodologia de Taguchi para as madeiras termorretificadas	58
Tabela 12- Resultado dos coeficientes dos fatores analisados obtidos pela matriz de correlação.....	60
Tabela 13- Coeficientes estimados e resumo do modelo de regressão L_{32}	60
Tabela 14- Coeficientes estimados e resumo do modelo de regressão L_{16}	61
Tabela 15 - Informações de agrupamento usando método de Tukey e Confiança de 95% para a relação granulometria da lixa e espécies de madeira L_{32}	62
Tabela 16 - Informações de agrupamento usando método de Tukey e confiança de 95% dos dados da matriz L_{32} analisando a relação entre os fatores temperatura de termorretificação e madeira	65

Tabela 17- Informações de agrupamento usando método de Tukey e confiança de 95 dos dados da matriz L_{16} analisando a relação entre os fatores temperatura de termorretificação e madeira	66
Tabela 18- Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (R_a) do experimento fatorial completo L_{16} do processo de lixamento do <i>Corymbia citriodora</i>	69
Tabela 19- Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (R_a) do experimento fatorial completo L_{16} do processo de lixamento do <i>Pinus elliottii</i>	69
Tabela 20- Resultado de Tukey do <i>C. citriodora</i> entre os fatores temperatura e granulometria da lixa	70
Tabela 21- ANOVA das madeiras não termorretificada formada pela matriz L_8 do experimento fatorial completo.....	76
Tabela 22 - Valores descritivos da potência (W) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo L_{40} do lixamento do <i>Corymbia citriodora</i>	78
Tabela 23- Continuação dos valores descritivos da potência (W) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do <i>Pinus elliottii</i>	79
Tabela 24 - ANOVA com a matriz L_{32} , experimento fatorial completo com as madeiras termorretificadas para análise da potência.....	81
Tabela 25 - Coeficientes dos fatores formados pelo matiz de correlação da matriz L_{32} referentes a potência de lixamento	82
Tabela 26 - Coeficientes estimados e resumo do modelo de regressão para potência de lixamento	82
Tabela 27 - Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (R_a) do experimento fatorial completo do processo de lixamento do <i>Corymbia citriodora</i> para lixas de 120,150 e 220 mesh.....	83
Tabela 28 - Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (R_a) do experimento fatorial completo do processo de lixamento do <i>P.elliotti</i>	83
Tabela 29- Coeficientes da matiz de correlação para o <i>C.citriodora</i> para as lixas de 120,150 e 220 mesh.....	84
Tabela 30- Coeficientes da matiz de correlação para o <i>P.elliotti</i>	84
Tabela 31- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey para o <i>C.citriodora</i>	85
Tabela 32- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey para o <i>P.elliotti</i>	86

Tabela 33- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey para o <i>C.citriodora</i>	87
Tabela 34- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey para o <i>P.elliotti</i> 87	
Tabela 35 - Informações de Agrupamento de Tukey do <i>Corymbia citriodora</i> 120 ,150, 220 mesh.....	89
Tabela 36- <i>Corymbia citriodora</i> termorretificado com a lixa de 100 mesh.....	89
Tabela 37 - Informações de Agrupamento de Tukey do <i>Pinus elliotti</i> 100, 120 ,150 e 220 mesh.....	90
Tabela 38 - ANOVA das madeiras não termorretificada formada pela matriz L_8 do experimento fatorial completo em relação ao parâmetro potência.....	94
Tabela 39 - Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95% em relação aos fatores madeira e granulometria	95
Tabela 40- Coeficiente de correlação da matriz de dados L_{16} para não termorretificada.	95
Tabela 41- Valores descritivos da vibração (m/s^2) em relação a todas às condições de ensaio obtidos como experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do <i>Corymbia citriodora</i>	97
Tabela 42- Continuação dos valores descritivos da vibração (m/s^2) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do <i>Pinus elliottii</i>	98
Tabela 43- ANOVA com a matriz L_{32} , experimento fatorial completo com as madeiras termorretificadas para análise da potência.....	100
Tabela 44- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95% da relação dos fatores madeira e granulometria da lixa no valor da média da vibração	101
Tabela 45- Coeficientes dos fatores formados pelo matiz de correlação.	103
Tabela 46 - ANOVA com a matriz L_8 , experimento fatorial completo para analisar a vibração do sistema de lixamento no processamento das madeiras <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Pinus elliottii</i>	103
Tabela 47- Coeficientes dos fatores formados pelo matiz de correlação	104

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO DA PESQUISA	2
1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	5
1.3. OBJETIVOS	6
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA MADEIRA: ASPECTOS ANATÔMICOS	7
2.1. CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E MACROESTRUTURA DA MADEIRA	8
2.2. CONSTRUÇÃO DA PAREDE CELULAR E MICROESTRUTURAS DA MADEIRA	12
2.3. COMPONENTES POLIMÉRICOS DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA	14
2.4. CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS DO <i>Corymbia citriodora</i> & <i>Pinus elliottii</i>	16
2.4.1. <i>Corymbia Citriodora: origem, características e aplicabilidade</i>	18
2.4.2. <i>Pinus elliottii : origem, características e aplicabilidade</i>	19
3. PROCESSOS: TRATAMENTO TÉRMICO E LIXAMENTO	20
3.1. TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA	20
3.2. MODIFICAÇÕES DOS COMPONENTES POLIMÉRICOS DA MADEIRA NO TRATAMENTO TÉRMICO	21
3.2.1. <i>Relação da termorretificação com a coloração da madeira</i>	24
3.3. COMPORTAMENTO DAS MADEIRAS TRATADAS TERMICAMENTE ...	25
3.3.1. <i>Corymbia citriodora</i>	25
3.3.2. <i>Pinus elliottii</i>	26
3.4. LIXAMENTO DA MADEIRA	27
3.5. ESTRUTURA DA LIXA E DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO DE LIXAMENTO	28
3.5.1. <i>Comportamento da lixa: empastamento, desprendimento do grão e desgaste</i> . 29	
3.6. GRÃO ABRASIVO: PROPRIEDADES E GRANULOMETRIA	32
3.6.1. <i>Óxido de alumínio: características e comportamento</i>	33
3.6.2. <i>Granulometria: classificação do tamanho do grão abrasivo</i>	34

4. CONCEITOS E APLICABILIDADE DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE DADOS	36
4.1. EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO.....	36
4.2. MÉTODO TAGUCHI: CONCEITO E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL...	36
4.3. REGRESSÃO MÚLTIPLA.....	38
4.4. RUGOSIDADE SUPERFICIAL	38
4.4.1. <i>Rugosidade Média (Ra): conceito, medição superficial e importância do parâmetro.</i>	39
4.5. POTÊNCIA DE LIXAMENTO	41
4.6. VIBRAÇÃO DO SISTEMA DE LIXAMENTO	42
4.7. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV	43
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
5.1. SELEÇÃO DOS MATERIAIS: MADEIRAS E LIXAS	45
5.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS	45
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS	46
5.3.1. <i>Teor de umidade (%)</i>	46
5.3.2. <i>Densidade aparente</i>	47
5.3.3. <i>Densidade básica</i>	47
5.4. ESTRUTURA DO SISTEMA DE ENSAIO DE LIXAMENTO.....	48
5.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50
5.5.1. <i>Medição da Rugosidade média (Ra) e Equacionamento da Potência e vibração do sistema.</i>	51
6.1. PARÂMETRO DE ANÁLISE: RUGOSIDADE SUPERFICIAL (Ra)	53
6.1.1. <i>Abordagem comparativa do experimento fatorial completo x método Taguchi das madeiras termorretificadas Corymbia citriodora e Pinus elliottii.</i>	53
6.1.2. <i>Abordagem utilizando o experimento fatorial completo para analisar o processo de lixamento das madeiras Corymbia citriodora e Pinus elliottii sem tratamento térmico</i>	75
6.2. PARÂMETRO DE ANÁLISE: POTÊNCIA DE LIXAMENTO	77
6.2.1. <i>Aplicação do experimento fatorial completo para analisar o comportamento da potência dissipada no processo de lixamento das madeiras termorretificadas Corymbia citriodora e Pinus elliottii.</i>	77

6.2.2.	<i>Abordagem experimento fatorial completo para analisar a potência dissipada no processo de lixamento das madeiras Pinus elliottii e Corymbia citriodora</i>	93
6.3.	PARÂMETRO DE ANÁLISE: VIBRAÇÃO	96
6.3.1.	<i>Abordagem experimento fatorial completo para analisar o comportamento da vibração das madeiras Corymbia citriodora e Pinus elliottii com e sem tratamento térmico</i>	96
6.4.	COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE O ASPECTO DA MADEIRA MODIFICADA TERMICAMENTE E IMAGEM MICROSCÓPICA (MEV)	104
7.	CONCLUSÕES	114
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	118



1. INTRODUÇÃO

A indústria madeireira é considerada um setor versátil porque fornece uma gama de produtos, dentre estes, na forma sólida, aparente ou revestida, em painéis compensados, chapas de fibra, os quais abastecem predominantemente as industriais movelarias e da construção civil. Destacando – se no mercado, os PMVA - Produto de Maior Valor Agregado (PMVA), formado por diversos produtos obtidos através do reprocessamento de madeira serrada como *blocks*, *blanks*, molduras, móveis, painéis de sarrafos colados lateralmente (EGP), instrumentos musicais, portas e dentre outros (MARTINS, 2008).

Para fabricá-los pode-se usar as madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliotti*, as quais se adaptaram ao solo e clima brasileiro e atualmente são uma das principais espécies que abastecem as indústrias madeireiras, substituindo as de florestas tropicais.

Os produtos manufaturados de madeira são fundamentais para a sociedade moderna, pois além dos atributos de beleza e versatilidade, é um material ecologicamente correto e de baixo consumo energético, e quando obtido de florestas geridas de forma sustentável torna-se um dos materiais que mais respeita ao meio ambiente (RAMAGE, 2017).

No entanto, para diversificar o segmento industrial do PMVA, a fim de conquistar ainda mais mercado, é necessário criar produtos com excelente aparência, quesito de qualidade, que envolvem como aspectos principais a cor e o acabamento superficial da madeira.

Um processo tecnológico usado para modificar a coloração da madeira é o tratamento térmico, como a termorretificação ou também denominado de retificação. A coloração é um dos principais atributos de aparência a serem notados no produto, sendo possível neste processo, modificar a cor original da madeira atingindo colorações semelhantes às madeiras tropicais, que são as de maior valor econômico no mercado ou alterando a aparência, tornando-a mais atrativa esteticamente (MISSIO *et al.*, 2015).

Outro aspecto de qualidade superficial importante é obtido por meio de um dos processos mais significativos na indústria madeireira, o lixamento que tem a função de adequar as dimensões e proporcionar o acabamento superficial do produto (BAO *et al.*, 2018).



Porém, mesmo sendo importante, o processo de lixamento não é padronizado nas indústrias madeireiras interferindo na qualidade do produto e aumentando os gastos de produção com desperdícios de lixas, revestimentos e realização de *setup* não programado das lixadeiras, tornando-se por isso, um dos processamentos mecânicos da madeira de maior custo (RATNASINGAMI *et al.*, 1999).

A dificuldade de padronizá-lo encontra-se em analisar as interações das variáveis madeira e lixa, pois tratam-se de materiais complexos. A madeira é um material heterogêneo que varia suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, devido a questões anatômicas e ambientais, entre suas espécies; em uma mesma espécie e em uma mesma tora (PRITZKOW *et al.*, 2014). Enquanto a lixa possui distribuição aleatória dos grãos e possui formato não definido, aumentando ainda mais a variabilidade do processo (GROOVER *et al.*, 2004).

Sabendo-se disto, a fim de contribuir para o crescimento do setor industrial madeireiro, este trabalho teve por objetivo realizar uma investigação analítica para obter informações do processo de lixamento das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, termorretificadas e não termorretificadas em relação ao comportamento da potência, vibração, rugosidade superficial e aspectos visuais.

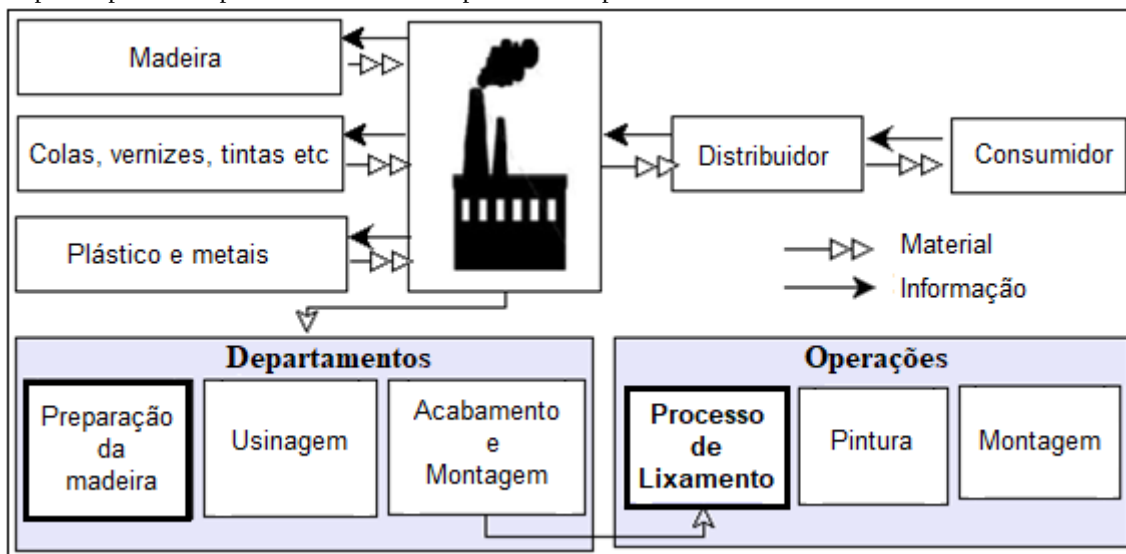
1.1. DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO DA PESQUISA

A Figura 1 esquematiza a cadeia produtiva simplificada da transformação da madeira serrada na fabricação de alguns produtos de destaque no Brasil no segmento de PMVA, como por exemplo, molduras, móveis e portas. Sendo destacados no esquema, os processos relacionados com as características de aparência dos produtos, ou seja, aspectos visuais da coloração e acabamento superficial, estando estes respectivamente envolvidos nas etapas de preparação da madeira e lixamento.

Nas indústrias brasileiras o departamento de preparação é o responsável por realizar o processo de secagem, etapa vital considerada como uma das operação mais importantes no processamento da madeira sólida pois assegura o dimensionamento estável da madeira; reduz os riscos do ataque de fungos manchadores e apodrecedores; melhorara a aplicação e atuação de verniz, tinta e adesivo e aumenta a resistência mecânica do material (SEVERO, 2009; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985)



Figura 1 - Esquema da cadeia produtiva simplificada da transformação da madeira serrada com foco nas etapas responsáveis pelas características superficiais do produto.



Fonte: adaptado (FILHO, 2004)

O processo de retificação poderia ser incorporado também ao departamento de preparação da madeira, pois devido ao seu maior gradiente de temperatura possibilita os benefícios da secagem e modifica a coloração da madeira, diversificando a matriz de produção com diferentes cores de matéria-prima, aumentando o valor agregado do produto (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

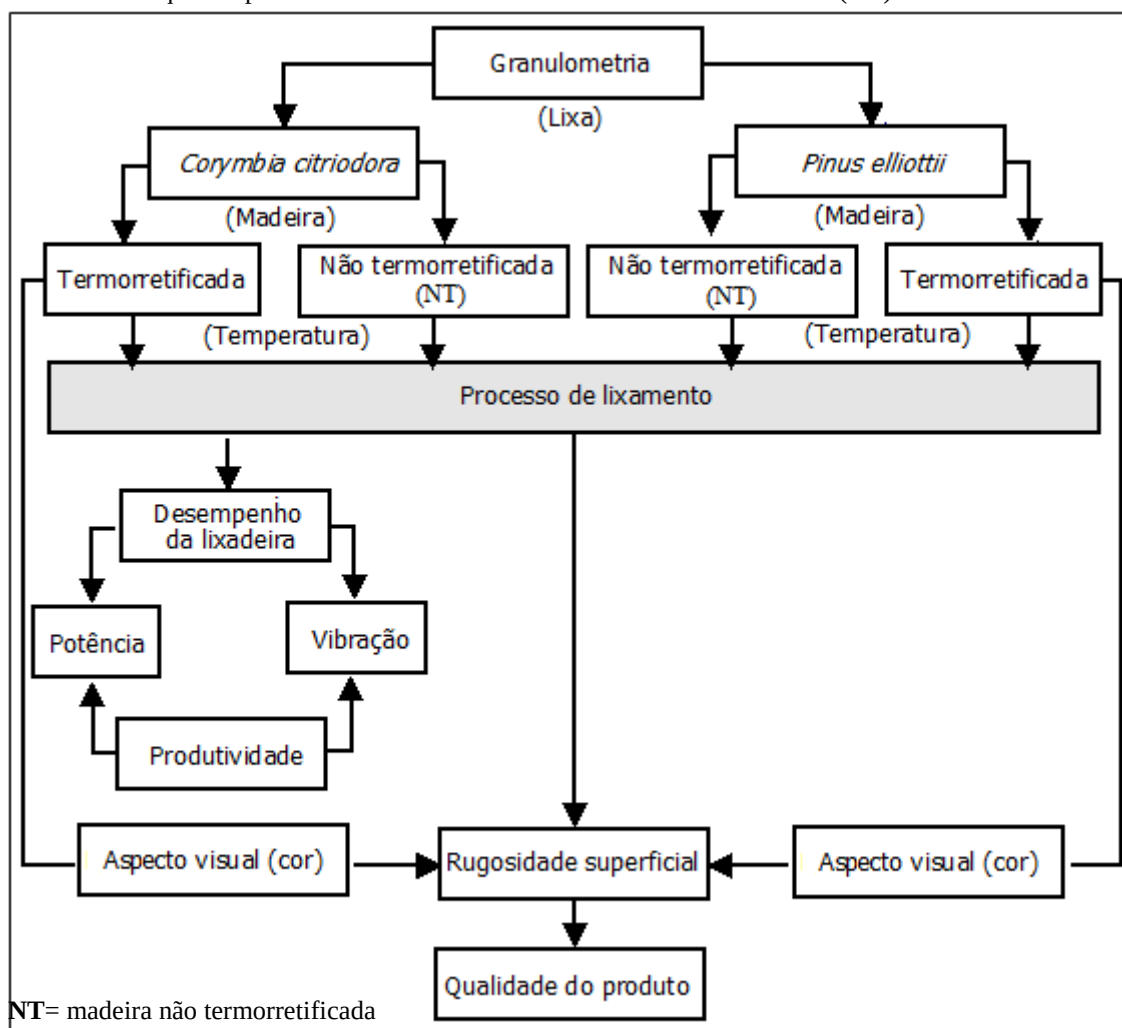
Há também outra característica da aparência do produto importante, o acabamento superficial, obtido geralmente pelo lixamento da madeira. Tal processo é um dos mais importantes porque influencia diretamente nos subsequentes processos de pintura e até mesmo na resistência entre madeira e adesivo (BAO *et al.*, 2018).

Portanto, estes processos são importantes para qualidade da aparência do produto, a termoretificação no que tange o aspecto visual em relação a cor da madeira, e do lixamento referente ao acabamento superficial. Por isso, objetivou analisá-los para expandir a gama de possibilidades mercadológicas nas indústrias madeireiras.

A Figura 2 esquematiza de forma simplificada os fatores de entrada selecionados na pesquisa, sendo estipulado os seus respectivos níveis: lixa de óxido de alumínio nas granulometrias de 100, 120, 150 e 220 *mesh* ; gradiente de temperatura do tratamento térmico das madeiras de 80, 120, 160 e 200°C ; madeiras não termoretificadas (NT) ; e as espécies de madeira *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.



Figura 2 - Esquema ilustrativo das variáveis analisadas na pesquisa para obter informações sobre o comportamento da potência, vibração e rugosidade superficial do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* no lixamento quando processados termorretificados e não termorretificados (NT)



A análise das variáveis presentes na Figura 2 visa responder a seguinte questão:

- Como a granulometria da lixa e as espécies de madeira *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*, quando termorretificadas e não termorretificadas influenciam no comportamento da rugosidade superficial (R_a) da madeira e na potência e vibração do sistema?

A fim de responder esta questão, optou-se por realizar um experimento fatorial completo, o qual inclui todas as combinações entre os níveis dos fatores do experimento, para estudar os seus efeitos no comportamento de uma variável resposta de interesse (MONTGOMERY, 2000).

Porém, devido ao grande número de fatores presentes no lixamento relacionados à madeira, lixa e temperatura, é necessária a aplicação de um método de planejamento



experimental que busque a minimização das experiências, como por exemplo, o método Taguchi (ZHANG; SUN, 2015).

A aplicação do método Taguchi é para responder a seguinte questão: - o método Taguchi pode substituir o experimento fatorial completo para analisar processamentos mecânicos da madeira como o lixamento, que envolve material complexo e heterogêneo, como a madeira e a lixa? Para responder tal pergunta, aplicou os dois métodos experimental completo e Taguchi comparando os resultados entre eles.

1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Dentre os diversos materiais usados a madeira destaca-se por sua variabilidade natural, propriedades físicas e mecânicas e características estéticas, permitindo sua utilização em uma variada gama de aplicações industrial (MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*, 2015).

No entanto, há necessidade de estudos quanto ao seu correto processamento mecânico, visto que, fatores genéticos e ambientais afetam nas propriedades físicas, térmicas, químicas e mecânicas da madeira, interferindo consecutivamente no desempenho e desenvolvimento do produto. Isto torna o processamento da madeira imerso de variabilidades, dificultando então na padronização do seu processo industrial (ZHANG *et al.*, 2014 ; TRIANOSKI, 2014).

Deve-se, portanto, ter estudos na área de processamento mecânico da madeira e principalmente, em relação às espécies de reflorestamento cujos produtos manufaturados são relevantes para abastecer o mercado contemporâneo, diversificando e incentivando a matriz de produção sustentável. Sendo uma alternativa o uso do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, madeiras que são usadas principalmente nos setores da construção civil e na fabricação de móveis (ARAUJO *et al.*, 2005).

Porém, devido as suas características intrínsecas como alta higroscopicidade, anisotropia e cor esbranquiçada, as espécies de *Pinus*, são pouco apelativas para setores mais nobres do mercado consumidor (PERTUZZATTI *et al.*, 2016). E o *Corymbia* mesmo possuindo boas propriedades mecânicas, torna-se economicamente mais atrativo a partir de ajustes na sua estabilidade dimensional (DELUCIS *et al.*, 2014).



Estes aspectos podem ser melhorados com a termorretificação, considerado um processo de agregação de valor, que confere à madeira colorações semelhantes às das espécies tropicais, além de aumentar a estabilidade dimensional, resistência a agentes xilófagos e diminuir higroscopicidade (MOURA, *et al.*, 2011).

Portanto, as justificativas para este estudo é **(1)** contribuir com informações a respeito do comportamento da potência, vibração e rugosidade superficial relacionando madeiras termorretificadas e sem tratamento térmico no processo de lixamento; **(2)** investigar outros métodos experimentais de análise para compreender o processamento da madeira de forma otimizada e assertiva; e **(3)** incentivar pesquisas em relação ao processo de termorretificação da madeira, principalmente de espécies sustentáveis, como o *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.

Sendo que dentre estas justificativas as duas primeiras tornam-se inovadoras pois, a primeira corrobora com a obtenção de informações no processo de lixamento, para otimizar o setor, enquanto a segunda compara métodos diferentes para análise do processo, juntamente com aplicação de uma investigação analítica com base em testes estatísticos, cujo esquema de análise pode ser útil para contribuir no desenvolvimento de trabalhos futuros na área de tecnologia de produtos de base madeireira, bem como auxiliar na escolha da aplicação do método em relação ao procedimento experimental.

1.3. OBJETIVOS

Diante da necessidade de gerar informações que contribuam para a melhoria da eficiência e padronização do processo de lixamento de madeiras sustentáveis, termorretificadas e sem tratamento térmico são propostos os seguintes objetivos:

- a) Investigar estatisticamente a intensidade e significância das variáveis : lixas de óxido de alumínio (100, 120, 150 e 220 *mesh*), temperatura de termorretificação (80, 120,160 e 200°C) e sem tratamento térmico das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* no comportamento dos parâmetros potência, vibração e rugosidade superficial no processo de lixamento.
- b) Comparar se a aplicação do método Taguchi é eficiente tanto quanto ao experimento fatorial completo para analisar processos envolvendo a madeira e que abranjam muitas variáveis complexas, como o processo de lixamento.



2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA MADEIRA: ASPECTOS ANATÔMICOS

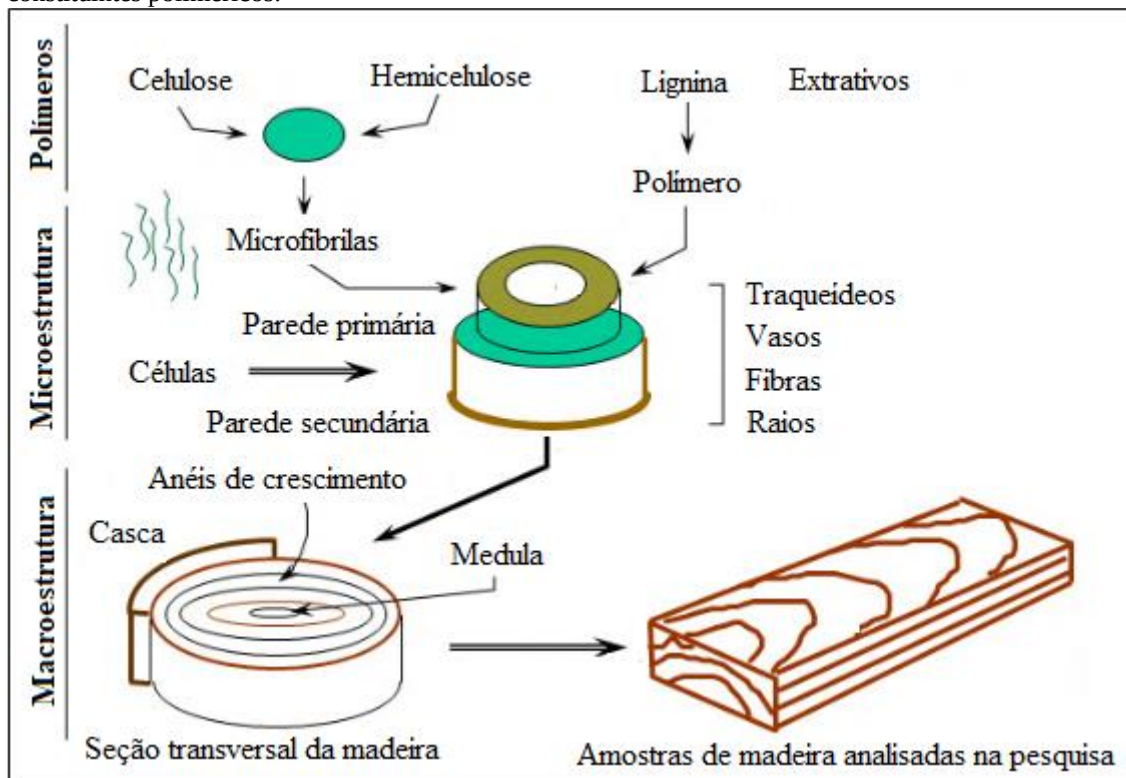
Dentre os principais produtos brasileiros do segmento Produto de Maior Valor Agregado (PMVA), destacam-se molduras, móveis e portas, podendo usar as madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* para fabricá-los. Espécies estas, importantes para o abastecimento das indústrias madeireiras, pois se tornaram substituta das madeiras provenientes de florestas tropicais, devido à indisponibilidade ocorrente do desmatamento e restrições ambientais (Instituto Brasileira de Árvores, 2016).

A diversificação dos produtos florestais madeireiro no mercado é devido à beleza e atributos da madeira, como suas propriedades mecânicas que proporcionam resistência a impactos e trabalhabilidade. Características que a permite ser processada em diversas formas e fixada facilmente com adesivos, pregos, cavilhas, parafusos, buchas etc. Além de ser resistente a oxidação, apresentar ótimas propriedades acústicas e ser considerada um excelente isolante térmico (HUNT, 2012).

No entanto, ao usá-la deve ser considerado a sua complexidade, adquirida através de um processo dinâmico e contínuo que inclui a proliferação de células com propriedades específicas para desempenharem funções importantes, como condução de líquido, transformação, armazenamento e transporte de substâncias nutritivas; e sustentação do vegetal. Sendo estas células altamente reguladas por fatores genéticos e ambientais que interferem nas propriedades mecânicas, físicas, térmicas e químicas do material e consequentemente no desempenho, desenvolvimento e fabricação do produto (ZHANG *et al.*, 2014 ;KRAJNC,2018).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2009), a intensificação no uso da madeira como matéria prima para fins industriais e construtivos só pode ocorrer a partir do conhecimento adequado de suas propriedades, sejam estas físicas ou mecânicas, as quais são derivadas das estruturas da parede celular e composição da sua constituição polimérica, que originam a macroestrutura do material, como informa o esquema na Figura 3.

Figura 3- Sequência organizacional da estrutura da madeira envolvendo a macro e micro estrutura e os constituintes poliméricos.



Fonte: adaptado SANTOS, 2007

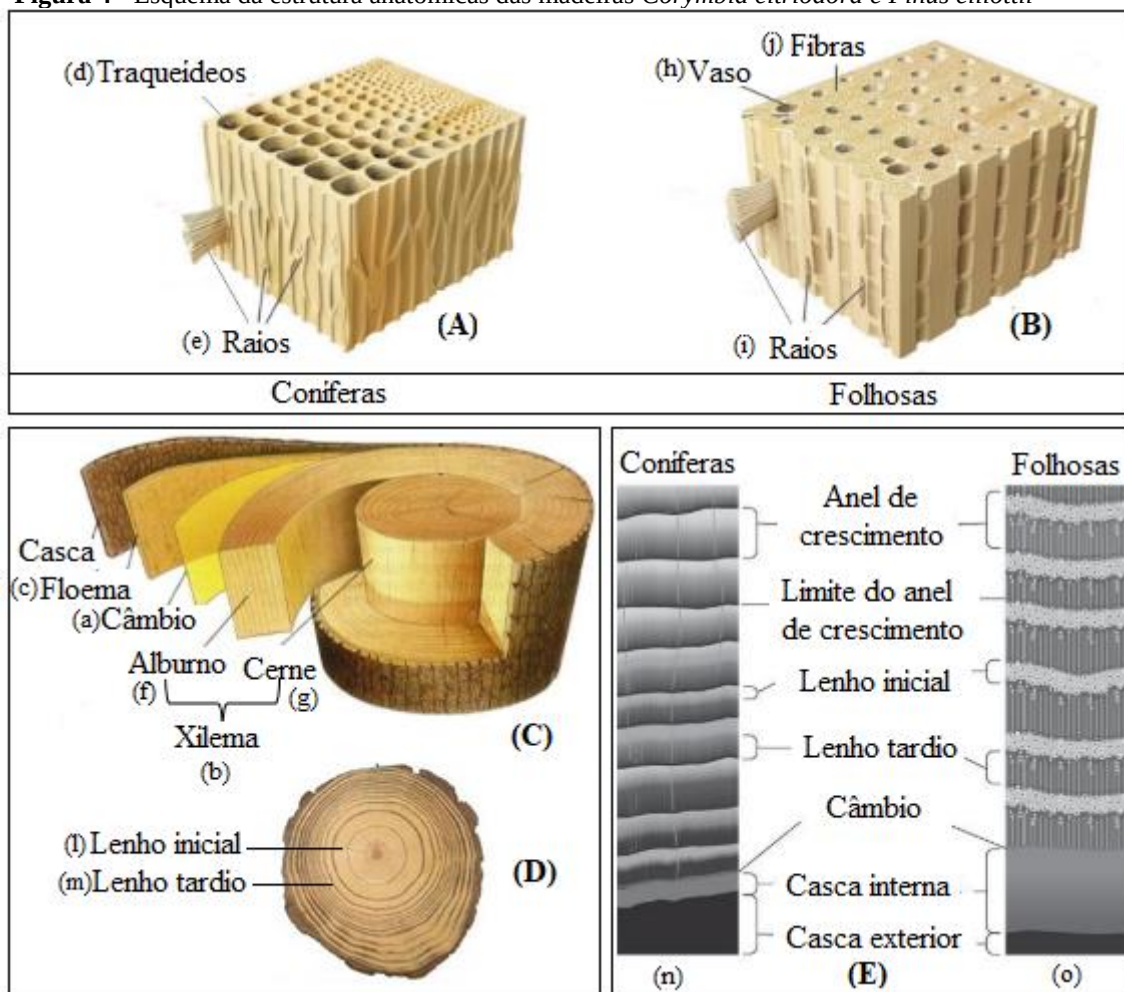
A estrutura da madeira é composta por meio de um arranjo engenhoso de seus componentes macroscópicos, microscópicos e poliméricos que formam a sua organização arquitetônica, sendo a fundamentação teórica referente à sua organização explicitadas a seguir.

2.1. CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E MACROESTRUTURA DA MADEIRA

Este tópico explica o desenvolvimento anatômico da madeira durante o seu crescimento, e no transcorrer do texto explicativo algumas estruturas são indicadas com letras em negrito em parênteses, as quais podem ser visualizadas na Figura 4.



Figura 4 - Esquema da estrutura anatômicas das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*



Legenda: Estruturas anatômicas das (A) coníferas e (B) folhosas com seus elementos estruturais, (C) elementos presentes na madeira (D) Seção transversal em que o câmbio vascular produzindo novas células de floema e xilema e (E) estrutura da madeira coníferas e folhosas, com anéis de crescimento. **Fontes:** adaptadas(MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*, 2015; SANTOS,2015 ; REMADE, 2018

A árvore cresce em dois sentidos: altura e diâmetro. O primeiro ocorre pela atividade do meristema apical, tecido vivo, cujas células localizadas na ponta dos ramos e raízes se multiplicam estimuladas por hormônios vegetais, originando novas folhas e galhos. O crescimento em altura é também denominado crescimento primário ou apical, muito comum a todas as plantas vasculares (ENCINAS *et al.*, 2005; LUZ, 2011).

O crescimento secundário acontece no sentido do diâmetro determinado pela atividade proliferativa do câmbio vascular (a), tecido meristemático, que sob a ação de hormônios é estimulado a dividir-se celularmente. As células originadas do câmbio são diferentes entre coníferas e folhosas. Enquanto, algumas células do câmbio se reproduzem e mantém o caráter meristemático (xilema ativo) (b), outras se transformam em tecido permanente (xilema inativo), denominado de floema (c), que permite a



renovação da casca e a produção das partes mais internas da madeira (MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*, 2015 ;KRAJNC *et al.*, 2018)

Xilema e floema são tecidos vasculares formados por células muito especializadas, sendo consideradas por isso estruturas complexas e importantes para os processos fisiológicos e o crescimento das plantas. São classificados em primários e secundários, os primários são formados a partir do procâmbio durante o crescimento primário e os secundários pelo câmbio vascular durante o crescimento secundário do corpo vegetal . Sendo considerado madeira a formação do xilema secundário através de divisão celular no câmbio vascular com auxílio dos polissacáridos (celuloses e hemiceluloses) e proteínas (MARCHI *et al.*, 2018; MYŠKOW *et al.*, 2018).

O xilema ou lenho, é responsável pelo transporte de água e solutos (seiva bruta) das raízes para as folhas. A maioria dos xilemas das coníferas é constituída exclusivamente por elementos traqueais que são traqueídeos (**d**) , raios (**e**) e elementos de vaso, por isso apresentam uma estrutura simples (TAYLOR *et al.*, 2002).

Os traqueídeos compõem aproximadamente 95% da madeira das coníferas, são células cilíndricas e alongadas com comprimento de até 5,0 mm e diâmetro de 0,06 mm, reforçada com lignina as tornando impermeáveis e rígidas, são condutoras de água e sais minerais e proporcionam sustentação para os caules. Os raios compõem 10% das coníferas, são células longas e achatadas que constituem o desenvolvimento transversal-radial da madeira, suas funções são conduzir e armazenar a seiva elaborada, além de criar uma estrutura anatômica, caracterizando a beleza singular da madeira, com efeito estético e decorativo. Os elementos de vasos, se comunicam lateralmente com outros vasos ou componentes do xilema por meio de pontuações, formando o alburno (MYŠKOW *et al.*, 2018 ;TAYLOR, 2002 ; SANTOS, 2015).

O alburno (**f**) é uma parte vascular ativa formada por madeira jovem de crescimento mais permeável, menos denso e comparado ao cerne (**g**) apresenta coloração mais clara , menor resistência mecânica e a agentes xilófagos. (SANTOS, 2015 ; PLOMION *et al.*, 2001).

O floema também conhecido como líber é uma estrutura presente nas folhosas, formada principalmente por vasos de condução elaborada (**h**) , raios (**i**) e fibras (**j**) (fibrotraqueídes, fibras libriformes, fibras septadas, fibras mucilaginosas), sendo por isso, uma estrutura mais complexa quando comparada com as coníferas. Os vasos são células



longas com variação de comprimento de 0,3 a 1 mm de diâmetro, possui seção transversal arredondada e vazada, responsáveis por transportar seiva bruta e armazenar materiais polimerizados. As fibras são células longas com até 1,5 mm de comprimento, seção transversal arredondada e vazada com paredes relativamente grossas e compõem cerca de 50% do volume do lenho das folhosas. Desempenham as funções de suporte sendo as principais responsáveis pela resistência mecânica e rigidez, sua porção no volume total da madeira e a espessura de suas paredes influenciam diretamente na densidade e movimentação higroscópica. Os raios são elementos característicos de distinção entre madeiras das folhosas, pois são longos e achatados, cuja principal função é conduzir e transportar seiva elaborada e substâncias de reserva nos arredores do lenho em direção à medula (SANTOS, 2015 ; MENCUCCINI *et al.*, 2009).

O floema está intimamente associado ao xilema, pois é formado a partir da modificação do albúrnio, transformando-se em cerne, região em que todos os elementos do lenho estão mortos, tratando-se portanto da parte inativa do xilema (MENCUCCINI *et al.*, 2009).

Por isso, no cerne acontece intensa impregnação das células por diversos extrativos, como taninos, antissépticos, pigmentos, óleos e resinas, os quais têm efeito significativo sobre as propriedades da madeira, mais notavelmente na sua resistência à deterioração a ataques biológicos, possibilitando sua durabilidade natural, evitando a decomposição dos tecidos mortos. Por conta disso, o cerne escurece e torna-se por vezes, produtor de aromas característicos para cada espécie vegetal. Além disso, é conhecido por ser uma região da madeira de maior resistência mecânica, atributo que o leva a ser comumente utilizado nas indústrias madeireiras nos segmentos da construção civil e movelaria (TAYLOR, 2002 ; BELT, 2018).

No entanto, não há uniformidades nas camadas do cerne e do albúrnio, pois o crescimento da madeira não ocorre de forma constante ao longo dos anos, devido aos fatores ambientais que esta imersa, como temperatura, luminosidade, disponibilidade de água, características do solo e dentre outros os quais afetam no seu desenvolvimento e acarretam no surgimento dos anéis de crescimento (ZUIDEMA *et al.*, 2018).

Os anéis de crescimento são formados por meio da deposição sucessiva de camadas de tecidos lenhosos, em razão da atividade cambial periódica. Assim, a atividade



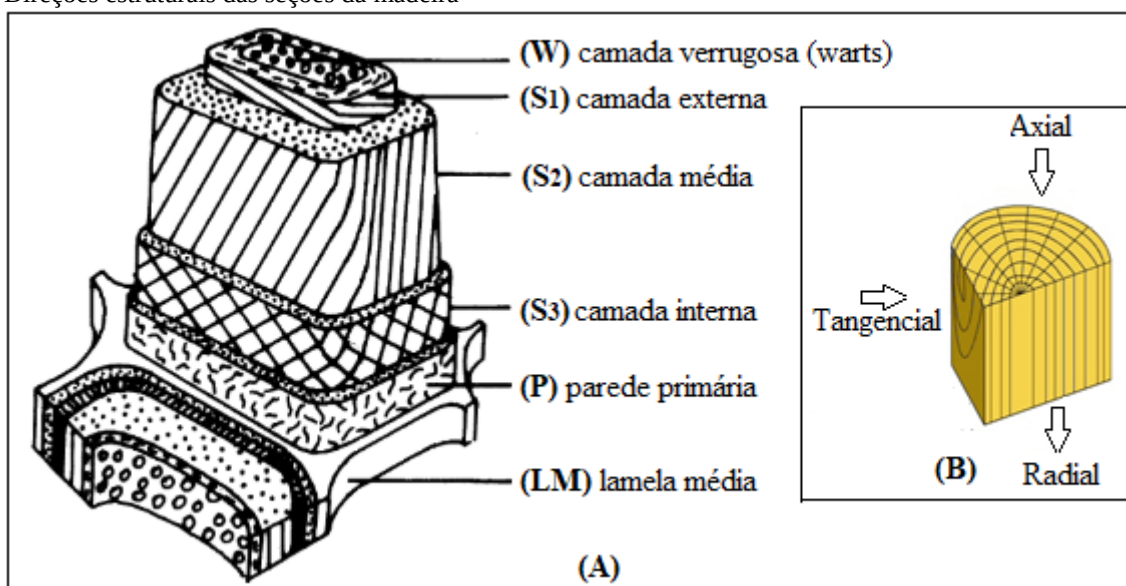
do câmbio acrescenta-se ano a ano com camadas justapostas que irão estruturar o material lenhoso (MATTOS, 1999 ;PLOMION, 2001).

Os anéis são compostos de duas camadas, a primeira lenho inicial **(I)** ou primaveril, cujo crescimento é rápido durante a primavera, menos denso e compostos por células grandes com paredes mais finas, permitindo um transporte de água eficiente para suportar fotossíntese intensa da estação. A segunda, lenho tardio **(m)** ou secundário, é a camada mais escura e menos porosa, desenvolvida em condições de menor disponibilidade de luz, calor e água (LUZ, 2011;CREBER;CHALONER,1984). Nas coníferas a transição pode ser gradual dos anéis, distinta ou uma combinação de cada uma **(n)**, enquanto as folhosas apresentam maior variação entre os anéis **(o)** (RAMAGE, 2017).

2.2. CONSTRUÇÃO DA PAREDE CELULAR E MICROESTRUTURAS DA MADEIRA

Este tópico aborda a construção da parede celular da madeira com suas microestruturas explicando e indicando as estruturas por meio de siglas em negrito que podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5- (A) Diagrama esquemático para ilustrar a estrutura geral da parede celular da madeira (B) Direções estruturais das seções da madeira



Fonte: adaptado HUANG *et al.*, 2003 adaptado QUOIRIN , 2019

A primeira membrana de separação a aparecer no processo de divisão celular é a lamela média **(LM)**, formada por um complexo de lignina-pectina, responsável por unir



as células adjacentes umas às outras. Há uma transição da lamela média para a camada adjacente, a parede primária (**P**) onde as microfibrilas de celulose são arranjadas em delgadas camadas que se cruzam formando um aspecto de redes. Esta parede é a primeira camada depositada durante o desenvolvimento da célula, por isso é uma camada fina, a espessura varia de 0,1 a 0,2 μm . Possui quantidade de celulose muito limitada, porém, contém hemiceluloses, pectina e proteínas (KLOCK *et al.*, 2005 ; HUANG *et al.*, 2003)

Finalizado o processo de diferenciação das células da parede primária, depositam-se novas membranas de microfibrilas, formando então a parede secundária, cujo espessamento varia de 1 a 10 μm e pode ser constituída por mais de 90% de celulose. É subdividida em três camadas: externa (**S₁**), média (**S₂**) e interna (**S₃**). A camada (**S₁**), tem espessura de 0,2 a 0,3 μm e a orientação das microfibrilas em relação ao eixo da célula pode variar de 50 a 70°, tornando o material resistente mecanicamente à compressão. Além disso, apresenta estrutura lignificada e é mais resistente ao ataque de fungos do que a camada (**S₂**) (RAMAGE, 2017 ;HUANG *et al.*, 2003)

A camada (**S₂**) é a mais espessa da parede celular formando por isso a porção principal, pode variar de 1 a 9 μm de espessura e é a responsável por 60 a 90% do volume da parede celular inteira. Devido à pequena inclinação das microfibrilas, de 5 a 15° possui alta resistência à tração, rigidez e baixa contração da madeira na direção longitudinal (RAMAGE, 2017; BATCHELOR, 1997)

A camada interna (**S₃**) apresenta microfibrilas de celulose arranjadas em uma inclinação que varia de 60 a 90°, proporcionando uma rigidez muito alta a célula. É constituída com pequenas quantidades de hidratos de carbono e substâncias pécicas que formam um sistema de arranjo com disposição de fibrilas de celulose, e além disso, possui uma concentração maior de substâncias não estruturais, ou seja, extrativos e cinzas (KLOCK, 2005 ; HUANG *et al.*, 2003).

Os traqueóides de coníferas e as fibras libríformes de folhosas, geralmente apresentam uma camada ou zona verrugosa (*warts*) (**W**), que é uma membrana delgada e amorfa, localizada na superfície interna da camada (**S₃**) (KLOCK, 2005 ;HUANG *et al.*, 2003).

É por possuir uma célula de estrutura estratificada com orientação de microfibrilas diferentes, que permite as árvores ajustarem rigidez e tenacidade do tecido, e confere a



madeira características como propriedades mecânicas, físicas, químicas e sua anisotropia (RAMAGE, 2017; SANTOS, 2015).

A anisotropia é a movimentação desigual das diferentes direções estruturais da madeira, radial, tangencial e axial (**Figura 5 (B)**). Característica esta, ainda mais acentuada devido a sua higroscopicidade, capacidade de absorver ou perder água para o meio ambiente, a fazendo contrair e inchar com trocas de umidade com o meio, resultando em uma instabilidade dimensional do material (RIBEIRO *et al.*, 2014).

2.3. COMPONENTES POLIMÉRICOS DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA

As paredes celulares, primária e secundária são formadas por três constituintes poliméricos principais: celulose e hemicelulose, ambos polissacarídeos e lignina, um polímero aromático. A celulose compara-se a um esqueleto criando forma e estrutura à parede celular, imersa a uma matriz porosa amórfica de hemicelulose, à qual é incrustada e aglutinada com lignina (KLOCK, 2005 ; MODES, 2010).

A celulose é um polímero linear de alta massa molar, constituída de unidades de β -D-glicose com cadeias longas e sem ramificações. Representa 40 a 50% do peso seco da madeira, sendo responsável por contribuir com importantes propriedades da madeira, como rigidez e resistência mecânica. Apresenta regiões cristalinas em grande parte do seu comprimento, que são interceptadas por regiões amorfas (**Figura 6(B)**), consideradas descontinuas e frágeis quando se avaliam fenômenos de ruptura da madeira diante de solicitações mecânicas (FIGUEROA E MORAES, 2009; SANTIAGO, 2011; SUNDQVIST, 2004).

As cadeias moleculares na celulose aparecem na forma de fibrilas elementares ou micelas ,que são mescladas paralelamente com hemiceluloses e pectinas. O conjunto de fibrilas constituem as microfibrilas (**Figura 6(A)**) com diâmetro de 3 a 5nm constituindo a parede celular. Quando as microfibrilas são agregadas em feixes maiores com lignina impregnada na estrutura, as fibrilas são geradas e elas por sua vez, formam as fibras de madeira (MODES, 2010; FIGUEROA; MORAES, 2009; MARTÍNEZ, 2014).

As hemiceluloses ou polioses (**Figura 6(A)**) compõem 20 a 30% de madeira seca, é considerada a interface entre celulose e lignina na estrutura do material. Trata-se de uma classe de polissacarídeos constituída de açúcares pentoses (xilose e arabinose), hexoses (glicose, manose e galactose) e ácidos urônicos que apresentam arranjo amorfo e, em



alguns casos, grupos laterais e ramificações. São os componentes mais higroscópicos da parede celular e a associação de um grupo de cadeias de celuloses envolvidas por moléculas de polioses é chamada microfibrilas que, em geral, apresenta distribuição uniforme na parede celular (MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*, 2015).

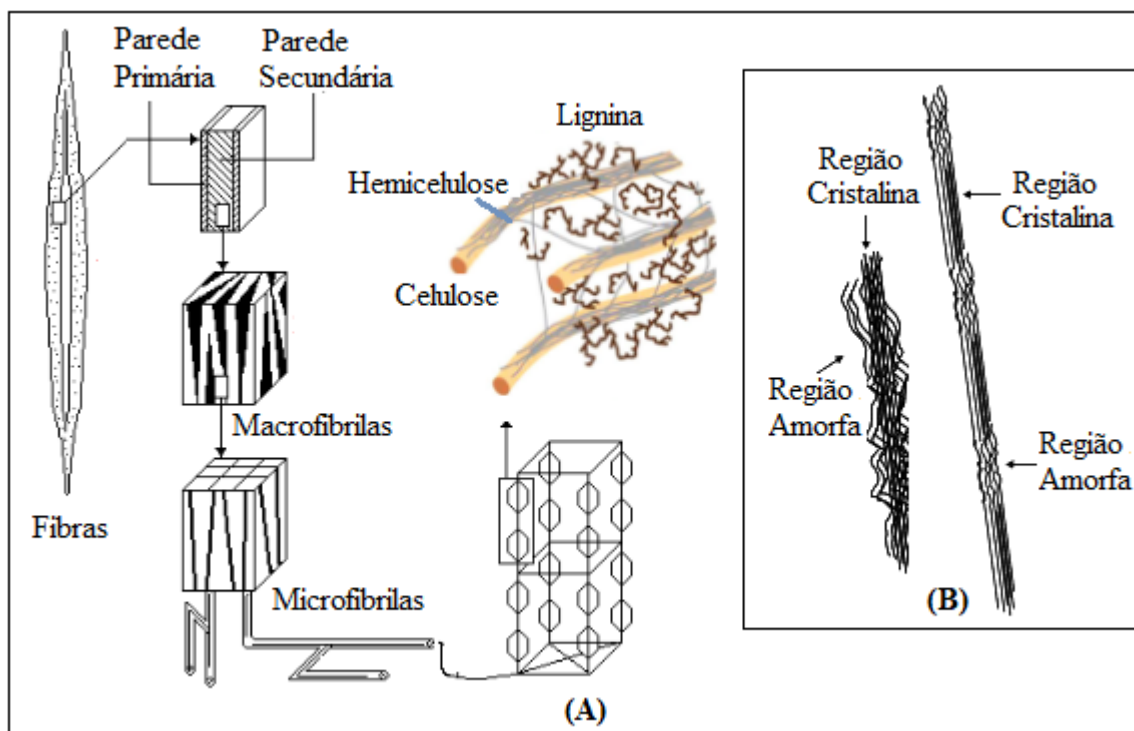
As hemiceluloses de “*Hardwood*” (madeira dura) são formadas de glucuronoxilano (15% a 30%) e também em menor grau de glucomanan (2% a 5%). Hemiceluloses da “*Softwood*” (madeira macia) consistem predominantemente de galactoglucomannan (20%), bem como quantidades menores de arabinoglucuronoxilano (5% -10%) (SUNDQVIST, 2004).

As moléculas de lignina (**Figura 6(A)**) são estruturas aromáticas complexas com uma ampla variação na configuração. O peso molecular médio é difícil de analisar, e valores variando de alguns milhares até centenas de milhares foram relatados, dependendo dos métodos analíticos utilizados. A quantidade de lignina na madeira varia de 20 a 40% e é frequentemente considerada a cola da estrutura da madeira (KLOCK, 2005 ; SUNDQVIST, 2004).

Trata-se de uma substância amorfa localizada na lamela média e na parede secundária, ligada às hemiceluloses e presente na maioria das plantas. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas tornando-a impermeável à água, protegendo contra a degradação microbiana, contribuindo como o agente cimentante unindo diferentes células nos tecidos lenhosos, proporcionando rigidez e resistência à compressão a parede celular (CARVALHO *et al.*, 2009).

Além dos polímeros citados a madeira é impregnada por compostos inorgânicos e orgânicos de baixa massa molar, denominados de extrativos, constituído de corantes, fenólicos, terebintina, ácidos graxos, resina e intermediários metabólicos simples, que conferem coloração e durabilidade natural à madeira, pois são tóxicos para fungos e insetos. São geralmente de baixo peso molecular, inferior a 500 g / mol e geralmente são presentes de 2% a 8% na madeira seca (KLOCK, 2005 ; SUNDQVIST, 2004; CARVALHO *et al.*, 2009 ; ANDERSEN, 2007).

Figura 6-(A) Esquema da formação estrutural da parede celular da madeira **(B)** Região cristalina e amórfica da celulose.



Fonte: adaptado MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*, 2015 ; KLOCK, 2005)

2.4. CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS DO *Corymbia citriodora* & *Pinus elliottii*

Pela botânica as árvores são classificadas como vegetais superiores, denominados de fanerógamas que apresentam complexidade anatômica e fisiológica, subdivididas em dois grupos: Gimnospermas e Angiospermas. As Gimnospermas dividem-se em várias classes, sendo a mais importante a das coníferas. No Brasil, a conífera nativa mais conhecida é o pinheiro-do-paraná cujo nome científico é *Araucaria angustifolia* e o *Pinus elliottii*, porém têm-se outros como o *Pinus caribaea*, *Pinus oocarpa*, *Pinus taeda*, *Pinus patula* etc. (HUANG *et al.*, 2003)

As coníferas caracterizam-se principalmente por serem resinosas e não apresentam vasos, possui traqueídeos, células predominantes posicionadas longitudinalmente dentro do tronco e constituem a maioria da massa lenhosa. São relativamente longas com cerca de 3 a 5 mm de comprimento com boa sobreposição entre elas, proporcionando boa resistência a impacto. Suas funções consistem no transporte de nutrientes e suporte da própria árvore. Também, estão presentes no tecido da madeira as células parenquimatosas que circundam a parte dos raios, posicionados radialmente



dentro do tronco e podem conter várias substâncias excretoras de resina (resinógenas), as quais correspondem cerca de 6 -10% do volume de madeira. Sua densidade pode variar entre 400 a 670 Kg.m⁻³ e contêm camadas alternadas de lenho inicial, que tem baixa densidade, e lenho tardio, que possui densidade três vezes maior. Isto a proporciona menor resistência mecânica. (MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*,2015 ;HUNT, 2012)

As angiospérmicas dividem-se em dois grupos, monocotiledóneas e dicotiledóneas, só estas podem ser designadas por árvores e são conhecidas por folhosas. Neste grupo incluem a maioria das espécies florestais brasileiras como a sucupira (*Bowdichianitida*), o ipê (*Tabebuia spp.*), o mogno (*Swieteniamacrophylla*), a andiroba (*Carapaguianensis*), o cedro (*Cedrella spp.*), o jatobá (*Hymenaeacourbaril*), o pau-brasil (*Caesalpiniaechinata*), o jacarandá-da-bahia (*Dalbergianigra*) e o eucalipto (*Corymbia citriodora*) (MARTINS, 2009)

As folhosas distinguem-se das gimnospérmicas por possuírem fibras com aproximadamente 1 a 3 mm de comprimento e 15 µm de largura, as quais constituem cerca de 50% do volume da madeira, sendo responsáveis por fornecer suporte estrutural. Apresentam também vasos condutores de água com média de 0,2 a 1,2 mm de comprimento e 0,05 a 0,8 mm de diâmetro, são participantes de 30% do volume da madeira. Tem densidade média a alta, cerca de 160 a 1200 kg.m⁻³, por causa das grandes diferenças na densidade entre as madeiras mais leves e as mais pesadas, as propriedades variam muito. As mais densas tendem a ser usadas tanto por suas boas propriedades mecânicas quanto por sua durabilidade natural em condições severas, ou por sua beleza natural e capacidade de aceitar o polimento quando usadas para móveis e outros fins decorativos. (MICHAEL H. RAMAGEA *et al.*,2015 ; HUNT, 2012 ; HUANG *et al.*,2003).

Quanto às diferenciações em relação aos componentes poliméricos, há maior teor de lignina em coníferas do que em folhosas, porcentagem média nas coníferas é de 15 - 35% e folhosas 20%. As hemiceluloses estão usualmente presentes em maiores quantidades nas folhosas, enquanto a celulose é a única que apresenta valores relativamente constantes, aproximadamente 40 a 45% para ambas as espécies. Nas folhosas, a variedade de extrativos é bem maior, englobando compostos fenólicos, aromáticos, taninos, compostos nitrogenados e inúmeros carboidratos. Nas coníferas,



predominam em diferentes composições as terebintinas que são voláteis, e o breu não volátil (SANTOS, 2007 ; FIGUEROA E MORAES, 2009 ; BAAS *et al*, 2004)

2.4.1. *Corymbia Citriodora: origem, características e aplicabilidade*

A partir de 1995 por meio de dados morfológicos, Hill e Johnson propôs o *Corymbia citriodora* como gênero diferente do *Eucalyptus*, tornando – a espécie do gênero *Corymbia* (*Myrtaceae*), o qual é composto atualmente por aproximadamente 113 espécies arbóreas (DICKINSON *et al.*, 2013)

O *Corymbia citriodora* é uma das principais espécies de folhosas da floresta da Austrália, é natural da faixa leste do estado de *Queensland* (QLD). Adaptou-se facilmente ao solo brasileiro estando presente principalmente nos seguintes estados: Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Pernambuco, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo (VARASQUIM, 2014)

É caracterizado por ter pouca folhagem, ótima forma de tronco com porte médio a grande, aproximadamente 50 metros de altura e 1,2 metros de DAP (diâmetro da altura do peito). De acordo com a norma ABNT NBR 7190/1997, apresenta os seguintes valores em relação a suas propriedades físicas e mecânicas: $\rho_{ap,12\%} = 999 \text{ Kg/m}^3$, $E_{c0}=18421\text{MPa}$ e $f_{c0}= 62\text{MPa}$ (DÖLL-BOSCARDIN *et al.*, 2010) .

As espécies de *Corymbia* são importantes para silvicultura devido à sua ampla adaptabilidade a ambientes tropicais e subtropicais, e por ser uma madeira durável de alta qualidade. O *Corymbia citriodora* possui bom desempenho quando comparado com outras espécies de *Eucalyptus* e *Corymbias* nos quesitos crescimento, propriedades mecânicas, sobrevivência e tolerância a pragas e doenças. Além disso, apresenta baixos custos de plantio e exigência qualitativa quanto ao solo, pois adaptando-se em terras pobres e pedregosas e tem alta resistência ao *déficit* hídrico (LEE, 2009; PACE, 2013).

É amplamente utilizada pela indústria madeireira para produção de papel, combustível, embarcações, assoalhos e para a confecção de móveis, já que, contém boas características de lixamento, furação, aplainamento e acabamento, ou seja, é de fácil trabalhabilidade (REIS *et al.*, 2013).



2.4.2. *Pinus elliottii* : origem, características e aplicabilidade

O *Pinus elliottii* é uma conífera pertencente ao gênero *Pinus sp.* é originária da América do Norte (EUA), e botanicamente denomina-se *Pinus elliottii var. elliottii*, porém é popularmente conhecido como pinus, pinheiro ou pinheiro-americano e internacionalmente de *slash pine*, *southern pine*, *southernyellow pine*. (FOX *et al.*, 2007).

Por desenvolver-se em regiões de climas temperados e tropicais tem sido cultivado em diversos países como Argentina, Chile, África do Sul, Austrália e Brasil, substituindo em grande parte a extração de espécies nativas como a *Araucária angustifolia*, conífera brasileira de importância econômica, porém escassa desde as décadas de 40 e 50 (MATTOS *et al.*, 2011)

Atualmente é plantada em larga escala na região sul estendendo ao Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e sul de São Paulo, os quais abastecem a grande demanda em escala industrial no crescente mercado da construção civil, indústria moveleira, marcenaria em geral e de embalagens (LEITE, 2015).

Seu crescimento é rápido, de fácil adaptação e de tratos silviculturais, seu porte varia de 18 a 30 m de altura, com um diâmetro em torno de 0,6 m. Segundo a norma ABNT NBR 7190/1997, apresenta os seguintes valores em relação a suas propriedades físicas e mecânicas: $\rho_{ap,12\%} = 560 \text{ Kg/m}^3$, $E_{c0} = 11889 \text{ MPa}$ e $f_{c0} = 40,4 \text{ MPa}$ (DÖLL-BOSCARDIN *et al.*, 2010).

Possui diversas aplicações, desde a produção de madeira para processamento mecânico até a extração de resina, servindo de matéria-prima para chapas, molduras, pisos, compensado, laminados, móveis, na construção civil etc. Esta versatilidade deve-se por sua trabalhabilidade, pois é fácil de desdobrar, aplainar, desenrolar, secar, lixar, torneiar, furar, fixar e colar (VARASQUIM, 2014; LEITE, 2015; BALLONI, 2009).



3. PROCESSOS: TRATAMENTO TÉRMICO E LIXAMENTO

3.1. TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA

O estudo em relação ao processo de tratamento térmico da madeira iniciou em 1946, porém, foi na última década somente que começou a ser sistematicamente pesquisado e aplicado em algumas indústrias europeias (ESTEVES *et al.*, 2008). Isto porque, mesmo sendo versátil e amplamente utilizada em diferentes aplicações, a madeira apresenta algumas características por vezes indesejáveis como anisotropia, higroscopicidade, instabilidade dimensional e suscetibilidade à degradação biológica, as quais originam problemas em seu processo de fabricação e na utilização do produto (CHIEN *et al.*, 2018; MODES *et al.*, 2017).

Para superar isto, têm-se processos de modificação da madeira que se dividem em quatro tipos: químico, superficial, por impregnação e térmico, sendo o último o que mais evolui em termos comerciais como a termorreificação. Isto porque, trata-se de uma etapa que não inclui compostos químicos, e mesmo assim tem se destacado por melhorar a resistência biológica aos agentes xilófagos, tornando-se por isso uma proposta viável para substituir o processo tradicional de tratamento preservativo feito por impregnação de compostos químicos em autoclave, além de melhorar a estabilidade dimensional da madeira e modificar a sua coloração, ressaltando sua beleza e a deixando visualmente mais comercial (ESTEVES ; PEREIRA, 2009; SILVA e MOLINA, 2012; GAFF, 2019).

Por estes motivos, o estudo nesta área aumentou significativamente nos últimos anos e ainda está crescendo. As pesquisas objetivam em sua maioria, aumentar a durabilidade da madeira e reduzir os prejuízos atribuídos à rejeição de peças com comportamento inadequado em sua formação ou modificar a coloração da madeira (ESTEVES ; PEREIRA, 2009).

As madeiras tratadas termicamente podem ser processadas, coladas ou pintadas, sendo por isso empregadas na confecção de diversos produtos como: *decks*, esquadrias, armários internos, *parquet*, painéis decorativos e interior de saunas, fabricações de móveis, pisos, componentes de janelas, instrumentos musicais entre outros produtos (PERTUZZATTI *et al.*, 2016; DELUCIS *et al.*, 2014).



Em relação ao processo, a termorretificação caracteriza-se pelo aquecimento da madeira, provocando a degradação dos seus componentes poliméricos, proporcionando mudanças em suas propriedades tecnológicas e de desempenho. A extensão dessas mudanças dependerá dos fatores relacionados à madeira e ao processo como: espécies e teor de umidade da madeira; uso ou não de atmosfera inerte com nitrogênio ou vapor; aplicação de óleos; pH da madeira; meio de aquecimento; gradiente de temperatura e período de tempo do tratamento (MISSIO *et al.*, 2015; SILVA, *et al.*, 2013; DIETENBERGER e HASBURGH, 2015).

Devido à variação destes fatores de controle há diferentes processos comerciais de termorretificação que são patenteados, por exemplo, pelas empresas do continente europeu: Finlândia (*ThermoWood® Process*), França (*Retification® e/ou Le Bois Perdure®*), Holanda (*Plato-Process®*) e Alemanha (*Oil-Heat- Treatment®*) (CALONEGO, 2009 ; MODES, 2010 ; BELEZIA, 2015)

O processo em que a madeira é modificada termicamente antes de atingir temperaturas próximas de 280°C é denominado de retificação. No entanto, geralmente as temperaturas do processo variam entre 160 a 280°C, 180 a 260°C ou na faixa menor de 120 a 260°C, sendo mantidas normalmente por um período de 2 a 24 horas na presença de oxigênio, ar e nitrogênio, ou no vácuo (BATISTA *et al.*, 2011; GAFF, 2019; BELEZIA, 2015 ; HUA *et al et al.*, 2018)

3.2. MODIFICAÇÕES DOS COMPONENTES POLIMÉRICOS DA MADEIRA NO TRATAMENTO TÉRMICO

As temperaturas abaixo de 40°C são atribuídas principalmente as mudanças físicas referentes à emissão de água e próximo a 70°C, ocorre à inibição da atividade biológica contribuindo para a diminuição da deterioração natural da madeira (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Os extrativos como os taninos podem decompor-se acima de 30°C resultando em perda de peso do material. Mas, a maioria sofre degradação entre 150 e 200°C, sendo os terpenos completamente degradados até 200°C enquanto os extratos moleculares altos, como as resinas, migram para a superfície da madeira (ESTEVES; PEREIRA, 2009; MISSIO *et al.*, 2015 ; HUA *et al et al.*, 2018 ;NUNES, 2009)



Entre 90 a 150°C ocorrem alterações em todos os componentes constituintes da madeira, porém quando o gradiente varia de 120 a 200°C a hemicelulose apresenta alterações químicas maiores, a celulose pequena e a lignina iniciam sua modificação. (MODES, 2010 ;FIGUEROA;MORAES, 2009).

As hemiceluloses se degradam mais facilmente devido à ausência de cristalinidade estrutural, baixa massa molecular, configuração irregular e ramificada. O principal mecanismo para essa degradação é a produção de ácido acético liberado pelo processo de hidrólise em que os grupos acetila são separados de suas associações com as hemiceluloses da madeira. Os componentes das hemiceluloses são pirolisados nas faixas de 200 a 300°C (DIETENBERGER;HASBURGH, 2015).

A celulose apresenta uma degradação mais resistente ao calor e isto é atribuído principalmente à sua fração cristalina que aumenta devido à degradação da celulose amórfica. Nas temperaturas entre 160 a 220°C, ocorre um aumento no índice de cristalinidade da celulose, mas a temperaturas superiores a 220°C, esta sofre redução e à medida que a temperatura aumenta o grau de polimerização da celulose diminui (DIETENBERGER; HASBURGH, 2015 ;BROWNE, 1955 ; BEALL e EICKNER, 1970).

Segundo Calonego, 2009 alguns artigos são contraditórios em relação ao efeito do tratamento térmico na rigidez da madeira, pois autores afirmam que há um aumento da espessura da região cristalina da celulose que impede a diminuição da rigidez do material, enquanto outros, que a perda de massa acentuada é suficiente para reduzir o módulo de elasticidade das madeiras.

Entre 100 e 200°C ocorrem reações de desidratação que se aceleram em torno de 200°C, as quais são as principais responsáveis pela pirólise de hemicelulose e lignina, gerando vapor de água e outros gases e líquidos não combustíveis, incluindo CO, CO₂, glioxal, ácido fórmico e acético (DIETENBERGER;HASBURGH, 2015). A degradação das hemiceluloses e lignina resulta na redução da higroscopicidade da madeira, que se torna significativa na faixa de 100 a 150°C. Próximo a 200°C a madeira termorretificada estabiliza-se em torno de 4 a 5% de umidade de equilíbrio, enquanto as não tratadas 10 a 12% (CALONEGO, 2009 ; MODES, 2010 ;ESTEVES; PEREIRA, 2008).

A lignina é o constituinte mais resistente à ação do calor, pois apresenta uma estrutura mais complexa, é afetada aproximadamente a 100°C, mas as mudanças notáveis



iniciam-se a 120°C e, a 180°C sua degradação é considerável. A 200°C ocorre à hidrólise acídica que resulta na quebra de ligações da lignina fragmentando em lignóis, resultando na diminuição da resistência mecânica do material. A pirólise da lignina ocorre nas faixas de 225 a 450°C. (FIGUEROA; MORAES, 2009 ;SCHAFFER, 1973).

Na Tabela 1 encontra de forma sintetizada as variações físico-químicas da madeira por SCHAFFER, 1973 com variação de temperatura entre 50 a 280°C.

Tabela 1- Alterações físico-químicas provocadas termicamente na madeira.

ΔT	Alterações da madeira	Fenômenos
55°C	A estrutura natural da lignina é alterada e a hemicelulose começa a amolecer.	
70°C	Começa a retração transversal da madeira.	
110°C	A lignina lentamente começa a perder peso.	
120°C	O teor de hemicelulose começa a diminuir e celulose alfa começa a aumentar. A lignina começa a amolecer.	▪ Processo denominado pirólise lenta.
140°C	A água de impregnação é liberada.	▪ Liberação de vapor d'água e gases.
160°C	A lignina se funde e começa a ressolidificar	▪ A madeira não se igniza.
180°C	A hemicelulose começa a perder peso rapidamente e a lignina da membrana de pontuação escoa	▪ Existência de algumas reações exotérmicas de oxidação.
200°C	A madeira começa perder peso rapidamente, as resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar	▪ Mudança de cor.
210°C	A lignina solidifica., a celulose amolece e despolimeriza e as reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas	▪ Aumento de reação química e eliminação de gases.
225°C	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada	▪ Ocorrência de reações exotérmicas primárias sem inflamação.
280°C	A lignina atinge 10% de perda de peso e a celulose começa a perder peso.	▪ Temperatura considerada como a temperatura de ignição. ▪ Fase conhecida como pirólise rápida

Fonte: adaptado (FIGUEROA; MORAES, 2009 e SCHAFFER, 1973)



3.2.1. Relação da termorreificação com a coloração da madeira

A cor da madeira é um dos primeiros contatos visuais do cliente que associa à superfície e ao desenho de uma peça, classificando-a esteticamente aceitável ou não na compra de produtos (UNSAL, 2005). Tornando-se, portanto, um fator importante, influenciando no valor agregado do produto, principalmente quando associado aos aspectos de textura e desenho do material, devendo por isso ser incorporada na caracterização superficial e tecnológica da madeira para atender ao mercado (MORI *et al.*, 2005).

A cor da madeira deriva da composição dos constituintes poliméricos hemicelulose, celulose, lignina e extrativos, presente na parede celular. Logo, a sua tonalidade está imersa em relação a vários fatores quanto aos agentes genéticos e ambientais (MORESCHI, 2012 ;CAMARGOS; GONÇALEZ , 2001).

Segundo Desh e Dinwoodie, 1993, as cores da madeira são causadas pela quantidade de extrativos presentes na parede celular do cerne que quando exposta à luz, ar, calor ou mesmo, ao longo do tempo, escurece ou clareia, de modo a alterar a sua cor.

Existem madeiras amarelas, avermelhadas, roxas e alaranjadas, a coloração pode variar em tonalidades que oscilam desde o bege claro até o marrom escuro, quase preto (MORI *et al.*, 2004). Estas cores podem ser encontradas no cerne de muitas espécies, e elas são explicadas devido a uma variedade de compostos fenólicos presentes na madeira como taninos, lignanas, flavonóides, quinonas, etc. (TAYLOR *et al.*, 2002).

Com a finalidade de aumentar o valor comercial de algumas espécies de madeira, principalmente as de reflorestamento, modificasse a sua cor por meio de tinturas, descolorações ou com tratamentos térmicos (MORESCHI, 2012).

Em geral, a modificação térmica altera a cor da madeira, porque afeta diretamente os constituintes poliméricos. A coloração é modificada inicialmente a temperaturas abaixo de 100°C, e substancialmente acima de 120°C, quando as hemiceluloses são afetadas. E as mudanças significativas e irreversíveis na coloração começam na faixa de 180 a 250°C. A cor mais escura da madeira termicamente modificada é causada pela degradação das hemiceluloses e subsequente surgimento de produtos formados a partir dela (REPUBLIC *et al.*, 2015; GAFF, 2019).



E o fluxo de resina em torno de nós em madeira de *Pinus* aumenta com temperaturas mais altas, podendo ser visto por meio de manchas marrom-escuras na superfície. No entanto, esta resina se cristalina e desaparece após o aplainamento e não causa danos (SEHLSTEDT-PERSSON,2003)

3.3. COMPORTAMENTO DAS MADEIRAS TRATADAS TERMICAMENTE

Neste tópico serão abordados os resultados de alguns estudos na área de termorretificação da madeira que analisaram o comportamento químico, físico ou mecânico do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* com temperaturas próximas ou iguais as estipuladas nesta pesquisa.

3.3.1. *Corymbia citriodora*

Analisando o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas do *Corymbia citriodora* nas temperaturas de 140, 160 e 180°C Menezes, *et al.*, 2014 concluiu que o tratamento foi eficiente na redução da umidade de equilíbrio, perda de massa, diminuição do inchamento total e do coeficiente de anisotropia.

Nunes, 2009 analisou o efeito da termorretificação com duas temperaturas 200 e 220°C, os resultados da pesquisa mostraram que os inchamentos lineares: longitudinal, tangencial, radial e volumétrico apresentaram valores menores do que a madeira não tratada para todas as posições estudadas (cerne, alburno e transição cerne/alburno) e a retratibilidade volumétrica para estas três posições diminuiu. Além disso, houve perda de 10 e 13%, respectivamente de massa nas temperaturas de 200 e 220°C. Por meio destes resultados, o autor concluiu que o tratamento térmico nestas temperaturas agrega valor e estabilidade dimensional à madeira.

Silva, *et al.*, 2013 avaliou a termorretificação do *Corymbia citriodora* nas temperaturas de 160, 180, 200, 220 e 240°C e observou que as temperaturas influenciaram significativamente nas propriedades mecânicas e na porcentagem da concentração dos componentes poliméricos, como pode-se ver na Tabela 2. Concluiu que o teor total de extrativos sofreu alta redução com o aumento da temperatura, enquanto o teor de lignina tendeu a aumentar. O módulo de elasticidade aumentou ao longo do tratamento térmico



até 180°C, apresentando as melhores propriedades mecânicas, provavelmente devido ao aumento da cristalinidade da celulose e lignina. Em altas temperaturas, acima de 180°C a degradação da holocelulose foi causada principalmente pela diminuição do teor de celulose, afetando conseqüentemente na redução do módulo de elasticidade. Os valores da resistência à compressão foram aproximadamente 23% menores do que o padrão brasileiro.

Tabela 2- Caracterização química da madeira *Corymbia citriodora* tratada termicamente com os valores médios percentuais dos componentes poliméricos juntamente como desvio padrão

Temperatura	Extrativos	Cinzas	Lignina	Holocelulose
Sem tratamento	17,85±0,69 ^a	0,31±0,02 ^a	30,44±0,01 ^a	69.56 ± 0.02 ^a
160°C	14,76±0,08 ^b	0,33±0,01 ^a	37,47±0,24 ^b	62.53 ± 0.38 ^b
180°C	10,22±0,54 ^c	0,29±0,01 ^a	33,49±0,72 ^c	66.51 ± 1.08 ^c
200°C	9,59±0,10 ^c	0,33±0,02 ^a	44,04±0,17 ^d	55.96 ± 0.3 ^d
220°C	6,35± 0,14 ^d	0,30±0,01 ^a	51,71±0,14 ^e	48.29 ± 0.29 ^e
240°C	3,51±0,24 ^e	0,47±0,03 ^b	53,86±0,4 ^f	46.14 ± 0.86 ^f

Valores seguidos pela mesma letra não são significativos (Tukey = 5%)
holocelulose (celulose + hemicelulose)

Fonte : Silva, *et al.*, 2013

3.3.2. *Pinus elliottii*

Pertuzzatti, *et al.*, 2016 termorretificou a madeira de *Pinus elliottii* em diferentes atmosferas (ar e óleo vegetal) na temperatura de 180°C e concluiu que houve alterações favoráveis nas propriedades físicas da madeira, sugerindo por isso, que fosse empregado na fabricação de produtos expostos a ambientes que oscilam a umidade, como esquadrias e móveis de jardins, bem como, para fins estéticos e decorativos, principalmente quando tratado com óleo.

Pertuzzatti, *et al.*, 2018 analisou o processo de termorretificação do *Pinus elliottii* nas temperaturas de 150 , 170 e 190°C e observou que a madeira apresentou ótimos resultados em termos de densidade aparente, diminuição da higroscopicidade e propriedades mecânicas, apresentando os melhores resultados na temperatura de 150°C. O autor sugere que tal espécie tratada termicamente seja usada em aplicações como pisos e decks.



Beleza, 2015 estudou a termorretilificação do *Pinus elliottii* nas seguintes temperaturas 140, 160, 180 e 200°C e analisou suas características físicas como massa específica, retratibilidade, inchamento linear e volumétrico. Concluiu que a madeira obteve estabilidade dimensional e os melhores resultados foram alcançados a 180°C. Além disso, observou que houve significativa alteração da coloração da madeira tornando a melhor esteticamente.

3.4. LIXAMENTO DA MADEIRA

O processo de lixamento é classificado como uma usinagem não convencional ou usinagem por abrasão, devido à lixa ser uma ferramenta de corte formada por grãos abrasivos, os quais não apresentam geometria definida de corte (D'YAKONOV, 2014).

A função do grão abrasivo é remover o material excedente da superfície através do atrito realizado entre a peça e o grão, buscando desgastar, polir ou limpar a superfície, contribuindo para produção de peças com qualidade superficial e precisão dimensional (BIANCHI *et al.*, 1999; KOSHIN, 2011).

Dentre os setores industriais o que mais aplica o processo de lixamento é o madeireiro, principalmente fabricantes de móveis, painéis, molduras, esquadrias, portas e dentre outros, com a finalidade de amenizar os danos causados na madeira durante o seu processamento, alcançando a dimensão desejada e tornando-a homogênea superficialmente, proporcionando assim uma condição ideal para o acabamento do produto de maneira exata e o mais econômico possível (RATNASINGAM, 2002).

Contudo, há de se levar em consideração a madeira quanto ao seu processamento devido sua heterogeneidade, fazendo-se necessária a aplicação correta de parâmetros da lixa e do maquinário, por exemplo, a troca de lixas para diferentes espécies de madeira em relação a granulometria e o tipo de grão abrasivo, bem como, em relação aos parâmetros da máquina, velocidade, força e pressão de lixamento ideais. No entanto, não se tem padrões estipulados para o processo, e consequentemente as indústrias processam a madeira de igual forma, e isto influencia diretamente na qualidade do produto e no custo do processo (ULISSES, 2009; HENDARTO *et al.*, 2013).

Segundo Leite *et al.*, 2019, o lixamento da madeira é tratado de forma empírica nas indústrias, afetando as vertentes da qualidade e custo do setor madeireiro, uma vez



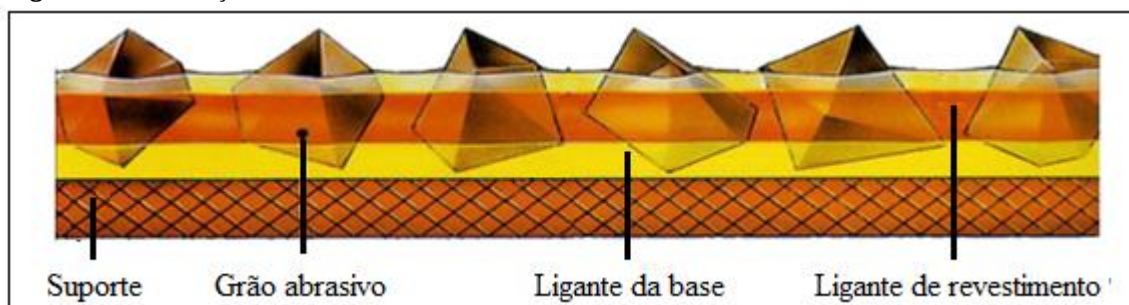
que a falta de padronização reduz a qualidade e aumenta os custos, principalmente quando se trata do consumo de lixas, pois se desgastam rapidamente, necessitando de contínua reposição.

De acordo com Saloni *et al.*, 2011 o preço da lixa por unidade é alto e a vida útil é curta. Não é incomum para as indústrias madeireiras gastarem mais do que o dobro do custo da lixadeira com a compra de abrasivos no período de um ano. O lixamento representa um processo importante e relevante na fabricação e processamento de produtos de madeira, o que implica também alto custo de materiais e mão de obra; portanto, atenção especial a esse processo é necessária.

3.5. ESTRUTURA DA LIXA E DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO DE LIXAMENTO

De acordo com a NBR 14960/2003 a lixa é um produto fabricado com a deposição de grãos de mineral abrasivo, previamente classificado a um tamanho específico sobre um costado de papel, tecido ou fibra vulcanizada e unidos por camadas de adesivos, como ilustra a Figura 7.

Figura 7- Constituição da estrutura da lixa



Fonte: CEPRA, 2005 adaptada

O suporte trata-se de um costado flexível ou semi-flexível para a aplicação dos ligantes e grãos abrasivos. O ligante é formado por substâncias minerais ou orgânicas, sintéticas ou naturais, responsável por fixar o abrasivo no suporte (LEITE, 2013).

Segundo Bianchi *et al.*, 2006 para manter o grão abrasivo em sua posição o ligante deve satisfazer as seguintes exigências: ser suficientemente resistente; formar pontes entre os grãos com seção transversal suficientemente grande e existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão.

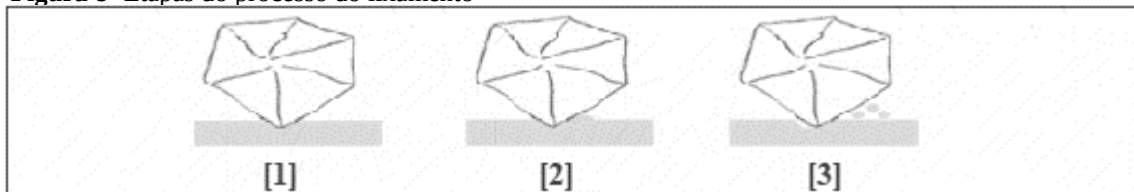


A fixação dos grãos abrasivos sobre o costado faz-se através de duas camadas de ligantes para dificultar o desprendimento do grão. A primeira é responsável pela ancoragem dos grãos ao costado, denominada de “*Maker*” (ligante base) e a outra de “*Sizer*” que recobre o grão (ligante do revestimento) (LEITE, 2016).

O grão abrasivo tem a função de desgastar, polir ou limpar superfícies. E isto ocorre, devido ao atrito gerado entre o grão e a peça, efetuando a operação de remoção do material, que acontece em três etapas descritas a seguir e são ilustradas na Figura 8.

O processo de lixamento inicia-se com o atrito do grão abrasivo no material usinado acarretando em um processo de modificação superficial pela eminência da aresta cortante penetrar à superfície [1]. Em seguida, ocorre o deslocamento do material, etapa em que há deformação plástica, formando o cavaco [2]. A última, os abrasivos removem o material, enquanto se desgastam à medida que ocorre o lixamento [3] (GOLÇALVES *et al.*, 2010 ; JACKSON *et al.* , 2013).

Figura 8- Etapas do processo do lixamento



Fonte: VARASQUIM, 2014 adaptado.

A remoção do material ocorre pelo desprendimento das fibras da madeira na forma de pequenos cavacos. A ação do grão o faz desgastar e pode ocasionar defeitos superficiais na forma de “buracos”, trincas e pré-rachamentos na madeira, afetando à qualidade superficial do produto (LEITE, 2013)

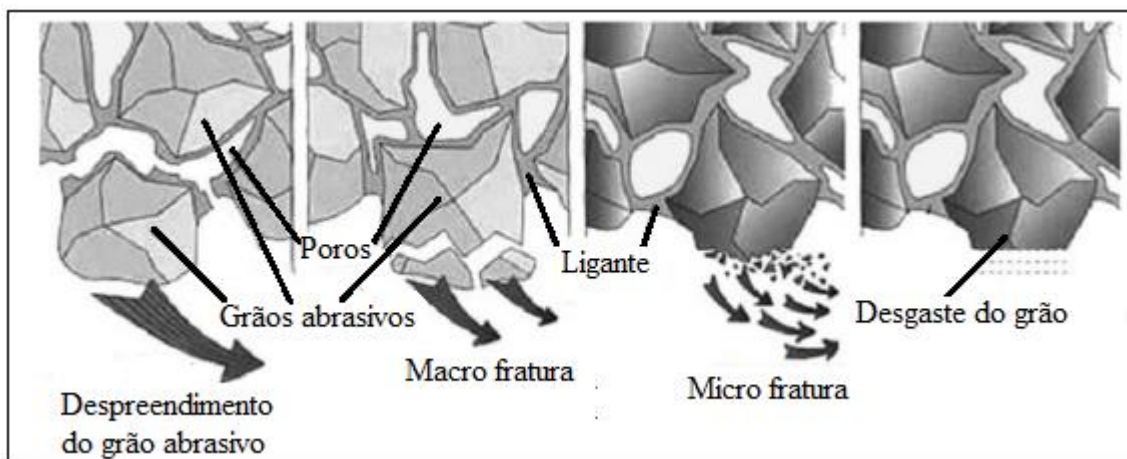
3.5.1. Comportamento da lixa: empastamento, desprendimento do grão e desgaste.

Segundo Varasquim, 2014 nos processos de usinagem por abrasão existem dois tipos de desgaste que o grão pode sofrer, a macro e micro fratura. Para que o lixamento da madeira ocorra, o grão deve se auto fraturar para gerar novas arestas em escala micrométrica ou submicrométrica, processo denominado micro fratura, enquanto os demais grãos permanecem afiados e com capacidade de corte. Quando o ligante é forte o suficiente para reter o grão e há forças de usinagem sobre o mesmo, então ocorre uma



fratura grosseira do grão, sendo esta a macro. A Figura 9 mostra a ocorrência da micro e macro fratura do grão, acarretando em seu desgaste ao longo do processo.

Figura 9-Comportamento do grão abrasivo da lixa no decorrer do processo de lixamento



Fonte: JACKSON E DAVIM, 2011 apud VARASQUIM, 2014 adaptado.

O grão também perde afiação com o empastamento da lixa, ou seja, com a adesão do material entre os grãos abrasivos. Isto foi descoberto por Date e Malkin, 1976 que observaram uma redução no desempenho do abrasivo conforme ocorria o entupimento de cavacos entre os grãos (**Figura 10[A]**).

O empastamento da lixa acentua-se pelas características anatômicas da madeira. Segundo Santiago, 2011 que estudou o processo de lixamento do *Pinus elliottii*, constatou que grãos menores da lixa foram obstruídos pela resina da madeira que preencherão os espaços vazios entre os grãos, contribuindo para a perda de corte do abrasivo. Porém, as granulometrias mais grossas não sofreram com a resina liberada devido ao maior espaço existente entre os grãos que permitiu maior armazenamento de material removido.

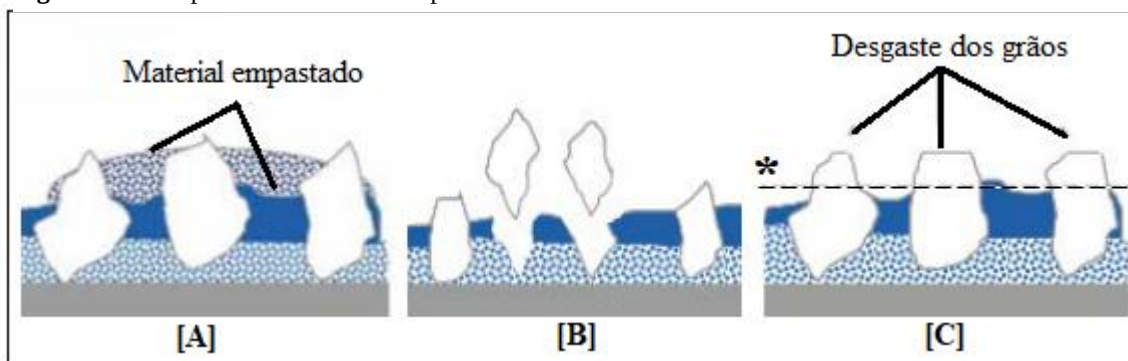
Caso o grão seja muito tenaz e o ligante apresente baixa dureza, ou, a força de corte do lixamento é extremamente elevada, o grão pode se desprender do ligante, muitas vezes, sem ter ao menos realizado o processo de usinagem (**Figura 10[B]**). (CANARIM, 2018).

Quando ocorre o empastamento ou retirada do grão na lixa, gera redução na eficiência de usinagem, pois diminui a taxa de remoção, aumenta o consumo de energia e eleva a temperatura do processo (SANTIAGO, 2011; LEITE *et al.*, 2019)



Mesmo sendo o desgaste inevitável da lixa (**Figura 10[C]**), deve-se atentar quanto a sua substituição, pois Leite *et al.*, 2019 estudou o processo de lixamento do *Pinus elliottii* com dois tipos de abrasivos, óxido de alumínio e carbetto de silício nas granulometrias: 80, 100 e 120 *mesh* e três condições da lixa: nova, seminova e desgastada. E concluiu que o valor da rugosidade média da superfície da madeira não se alterou quando as lixas estavam novas, seminovas e desgastadas até um determinado limite de uso para a mesma granulometria e mesmo abrasivo

Figura 10- Comportamento da lixa no processo de lixamento.



Legenda : (*) linha que mostra o desgaste normal esperado pelo grão ao longo do lixamento.

Fonte : (NORTON, 2012 apud LEITE, 2013)

No trabalho de Varasquim, 2016 o autor estudou o lixamento das espécies do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* com três tipos de grão abrasivos (óxido de alumínio, carbetto de silício e óxido de zircônio), três níveis de desgaste do grão abrasivo (sem desgaste, desgaste intermediário, desgaste severo) e três granulometrias (80, 100 e 120*mesh*). Concluiu que o desgaste abrasivo influenciou a rugosidade da mesma forma para todos os tipos de abrasivos, a saber, as lixas que não possuíam desgaste sempre se diferenciaram das lixas desgastadas, porém o tempo de desgaste gerou valores estatisticamente iguais.

Portanto, saber manusear adequadamente a lixa, fazer sua troca ou substituição corretamente, aliada às técnicas que prolonguem a durabilidade do abrasivo, é de grande benefício para a indústria da madeira. Pois, resultaria em economia de energia, redução na quantidade de lixas, otimização dos *setups* de lixas, além de proporcionar um acabamento superficial com qualidade (SALONI *et al.*, 2011 ;LEITE, 2016)



3.6. GRÃO ABRASIVO: PROPRIEDADES E GRANULOMETRIA

Os grãos abrasivos são materiais cerâmicos comumente empregados para fabricação de ferramentas, responsáveis por produzir peças de elevada qualidade superficial e com grande precisão. São divididos em duas classes, minérios naturais e sintéticos, sendo estes, usados em sua maioria para a composição das lixas (MARINESCU *et al.*, 2004).

Os abrasivos possuem propriedades, as quais são responsáveis pela resistência do grão ao desgaste como: dureza, tenacidade, resistência à temperatura e fragilidade. A dureza pode ser definida como a resistência à ação do risco, capaz de fornecer resistência à fratura do grão ao atrito durante o processo de usinagem por abrasão (STEMMER, 1992).

Segundo Moore; King, 1980 apud Pintaúde, 2002 "a dureza é certamente o fator mais importante na determinação do regime de desgaste, pois exerce um efeito marcante na deterioração das partículas abrasivas, e, conseqüentemente, na geometria das partículas e no tipo de contato".

A tenacidade mecanicamente representa o quanto de esforço, ou seja, trabalho deve ser efetuado para quebrar um grão abrasivo. Logo, quanto maior o esforço aplicado para que ocorra a ruptura, maior a tenacidade do material (NUSSBAUM, 1988).

Segundo Moore, 1980 a seleção de materiais resistentes ao desgaste abrasivo pode ser resumida como a maximização da dureza sem prejuízos à tenacidade à fratura. A combinação entre dureza e tenacidade proporciona melhor resistência à abrasão (PINTAÚDE, 2002).

A friabilidade é a capacidade do grão abrasivo em gerar novas arestas cortantes, por meio de micro e macro fraturas que ocorrem ao longo do processo de usinagem (JACKSON e HITCHINER, 2011).

Se o abrasivo tiver uma grande resistência à friabilidade, dificulta a criação de novas arestas de corte, diminuindo a taxa de remoção de material, aumentando a possibilidade de empastamento da lixa e podendo danificar a superfície (MARINESCU *et al.*, 2004).



A dureza e a friabilidade do abrasivo estão intrinsicamente relacionadas à morfologia, impurezas, forma do grão abrasivo e granulometria (tamanho do grão) (ARNT, 1999).

As propriedades térmicas dos grãos abrasivos influenciam na resistência ao desgaste, pois a dureza diminui com a temperatura, e por serem usados a altas temperaturas de corte é importante que as condições de operação sejam adequadas, para garantir sua estabilidade térmica (KLOCKE, 2009)

Segundo Varasquim, 2014 os grãos abrasivos mais utilizados para o lixamento da madeira são óxido de alumínio, carbetto de silício e atualmente os grãos de óxido de alumínio zirconados. Estes podem ser vistos na Figura 11, com suas principais características, respectivamente.

Figura 11-comportamento dos grãos abrasivos usados no processo de lixamento com suas principais características

Comportamento dos grãos no lixamento	Características
 carbetto de silício	- Alta dureza e baixa tenacidade - Afiado, frágil, altamente quebradiço, micro desgaste.
 óxido de alumínio	- Dureza e tenacidade - Arredondado, quebra em bloco, macro desgaste.
 óxido de alumínio zircônio	- Dureza e alta tenacidade - Pontiagudo, auto afiação, quebra em bloco, micro desgaste.

Fonte: KLINGSPOR, 2019

3.6.1. Óxido de alumínio: características e comportamento

O óxido de alumínio trata-se do grão mais popular no lixamento de madeiras porque possui um bom equilíbrio entre dureza, afiação e resistência. Seu formato arredondado o permite penetrar em materiais densos e se desgastar pouco, é aplicado no lixamento que requer altas pressões e para remover defeitos profundos até criar acabamentos superficiais mais finos (JACKSON e HITCHINER, 2011 ; SANTIAGO, 2011 ; VARASQUIM, 2014).



Saloni, 2003 concluiu que a taxa de remoção foi o dobro com óxido de alumínio do que com o carbeto de silício. Porém, mesmo com a maior remoção do material, foi responsável por superfícies com maior rugosidade proporcionando aspereza superficial para ambas as madeiras analisadas, *hard maple* (*Acer saccharum*) e pinheiro branco (*Pinus strobus*).

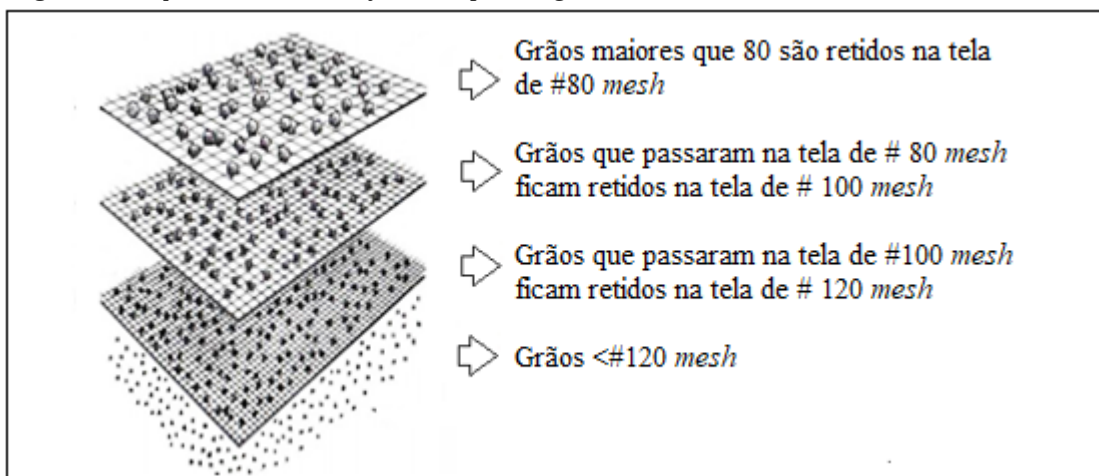
No entanto, no trabalho de Varasquim, 2014, para as espécies de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, os melhores valores de rugosidade média foram obtidos usando a lixa de óxido alumínio e os maiores com a de carbeto de silício.

Mesmo resultado foi obtido na pesquisa de Leite et. al., 2019 que também analisou o processo de lixamento do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* e concluiu que o óxido de alumínio devido à sua tenacidade, conserva a sua ação de corte por mais tempo no processo de lixamento e cria superfícies de madeira com menor rugosidade superficial, quando comparado ao carbeto de silício.

3.6.2. Granulometria: classificação do tamanho do grão abrasivo

A classificação mais usual que padroniza os tamanhos dos grãos é da norma ANSI Standard B 74.12, que os especificam 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, como mostra a Figura 12.

Figura 12-Esquema da classificação *mesh* para os grãos abrasivos.



Fonte: (Nagyszalanczy, 1997 apud Varasquim, 2014 adaptado)



A Tabela 3 apresenta uma proposta de classificação para diferentes granulometrias e suas aplicações no lixamento da madeira.

Tabela 3- Esquema da classificação *mesh* para os grãos abrasivos.

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

Fonte: Hawks, 1995

Abrasivos com maiores granulometrias, ou seja, de pequeno tamanho de grão, tendem a apresentar maior valor de resistência à penetração do que os grãos maiores, em virtude da menor tendência à destruição pontual de grãos (ARNT, 1999). Enquanto a friabilidade está relacionada ao tamanho do grão abrasivo, quanto maior a granulometria do material maior a capacidade desse grão se auto fraturar (VARASQUIM, 2014)

Porankiewicz *et al.*, 2010, concluiu que houve uma redução na taxa de remoção de material no processo de lixamento para granulometrias maiores, enquanto, as menores aumentaram a taxa de remoção.

Samolej, 2006 analisou o lixamento da madeira *Fagussilvatica* e concluiu que a pressão e granulometria interferem na potência de lixamento. A pressão comportou-se diretamente proporcional à potência e inversamente a granulometria. Resultados compatíveis às pesquisas de Okajová (1999) e Siklienka (2001). E em todas estas pesquisas mencionadas a rugosidade e a granulometria foram inversamente proporcionais, ou seja, granulometrias menores rugosidades maiores.



4. CONCEITOS E APLICABILIDADE DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE DADOS

4.1. EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

O experimento fatorial completo é um método de planejamento experimental, amplamente empregado na engenharia para compreender melhor o comportamento dos fatores de processo, bem como seu impacto nas características de qualidade do produto e processo em análise (MONTGOMERY, 2000)

Tal método inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento, possibilitando estudar os efeitos de vários fatores sobre uma variável resposta de interesse, inclusive por meio dos gráficos de interação que identifica se há interação entre os fatores analisados ou se estes são independentes (ARSALAN, 2016).

Outro meio de investigar a interação dos fatores é através da análise de variância (ANOVA), ferramenta estatística que auxilia na tomada de decisão, interpretando a significância das variáveis experimentadas (YANG, 2011).

Os testes de comparações múltiplas entre médias de tratamentos são também de grande interesse na pesquisa aplicada quando o objetivo do trabalho é comparar condições. E dentre os testes mais usados para comprovação dos resultados experimentais têm-se o teste de *Tukey*, o qual especifica quais condições diferem, ou não, estatisticamente entre si (THOMAS, 1991; GHOSH, 2017).

4.2. MÉTODO TAGUCHI: CONCEITO E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Ao aplicar o método Taguchi objetiva-se identificar e ajustar os fatores para minimizar a variação que possa interferir na qualidade do produto final. Sendo possível, determinar a combinação de fatores e interações que indicam as melhores condições para produzi-lo, causando pouco ou nenhum desvio do padrão desejado, padronizando o processo adequadamente (SAVADAMUTHU *et al.*, 2011).

A filosofia Taguchi possui o atrativo de usar o mínimo de experiências possíveis, implementando-se então, a custos baixos para realizar a gestão de qualidade. Além, de ser versátil, aplicando-se satisfatoriamente em diferentes segmentos indústrias, como:



aeroespacial, alimentício; esportivo; de comunicações; do meio ambiente; da construção; de energia; soldagem; engenharia mecânica e dentre outros (SADEGHI *et al.*, 2012).

Devido ao grande número de fatores presentes no processo de lixamento relacionados à madeira, lixa e máquina, é necessária a aplicação de um método de planejamento experimental que busque a minimização das experiências, como por exemplo, o método Taguchi (ZHANG; SU, 2015). Trabalhos aplicando o método Taguchi no planejamento experimental de madeiras podem ser encontrados em LEITE *et al.*, 2019 ; KE *et al.*, 2016 e DENES *et al.*, 2006.

Para a aplicação desse método realizam-se as seguintes etapas: (a) identificação dos fatores que interferem na qualidade do produto; (b) escolha dos níveis dos fatores; (c) escolha da matriz ortogonal; (d) realização dos ensaios; (e) análise dos resultados utilizando a relação sinal-ruído (S/N) e uma análise de variância (LANG, 2004)

Após identificar o número de fatores a ser investigado, especificam-se seus valores em níveis. Então, o arranjo da matriz ortogonal é escolhido para ser descrita por L_n , em que “ n ” representa o número de condições testadas. Para conhecê-la, os conceitos de projetos fatoriais 2^k são aplicados, sendo k a quantidade de fatores investigados a dois níveis, ou, o método da contagem do número de graus de liberdade, definido por Taguchi, que desenvolveu gráficos lineares e tabelas triangulares para adequada escolha da matriz (MERTOL, 1995)

O método Taguchi propõe a análise da resposta média para cada combinação no arranjo utilizando a razão sinal-ruído (S/N), cuja grandeza é medida em decibel (dB) que pode ser categorizada em três tipos: quanto menor melhor, quanto maior melhor ou nominal, conforme as Equações 1, 2 e 3 abaixo.

$$\text{Razão S/N menor e melhor: } S / N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

$$\text{Razão S/N maior melhor: } S / N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{Razão S/N nominal: } S / N = -10 \lg \left(\frac{1}{ns} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Onde, y representa o valor da resposta; n o número de repetições e s o desvio padrão (GU *et al.*, 2014)



O resultado de cada teste estima os efeitos dos fatores de ruído em relação aos parâmetros, obtendo a estatística de desempenho, valor que após ser interpretado permite a padronização do processo (KARABAS, 2013).

4.3. REGRESSÃO MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla é uma técnica estatística multivariada que busca verificar a relação entre uma única variável dependente com um conjunto de variáveis independentes. Normalmente, esta técnica é aplicada a problemas de pesquisa que buscam um modelo de previsão e explicação. A Equação (4) mostra o modelo de regressão linear múltipla, onde: Y = variável dependente; X_n = n -ésima variável independente; β_n = n -ésimo coeficiente ou parâmetro do modelo; ε = efeito da variável residual; α = constante (coeficiente linear da reta estimada) (HAIR *et al.*, 2009).

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Além disso, esta ferramenta analisa a colinearidade, relação linear entre duas variáveis explicativas; multicolinearidade, existência de relação linear entre uma variável explicativa e as demais; e fornece o coeficiente ajustado de determinação (R^2), o qual fornece o percentual de contribuição das variáveis independentes no comportamento da variável dependente (HAN *et al.*, 2017).

4.4. RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A trabalhabilidade ou usinabilidade da madeira refere-se à facilidade de ser processada para criar formas e superfícies desejadas com boa qualidade final, de forma mais econômica possível (SANTOS, 2013). Segundo Maldonado, 1998 a análise e o conhecimento da usinabilidade servem para descobrir as propriedades de mecanização de um determinado material para manipulá-lo em formas e dimensões definidas com qualidade superficial.



A qualidade superficial pode ser analisada por meio da rugosidade, parâmetro que quantifica micro - irregularidades geométricas produzidas nas operações de usinagem formadas pelas marcas oriundas do perfil da ferramenta (GOTTLÖBER *et al.*, 2014).

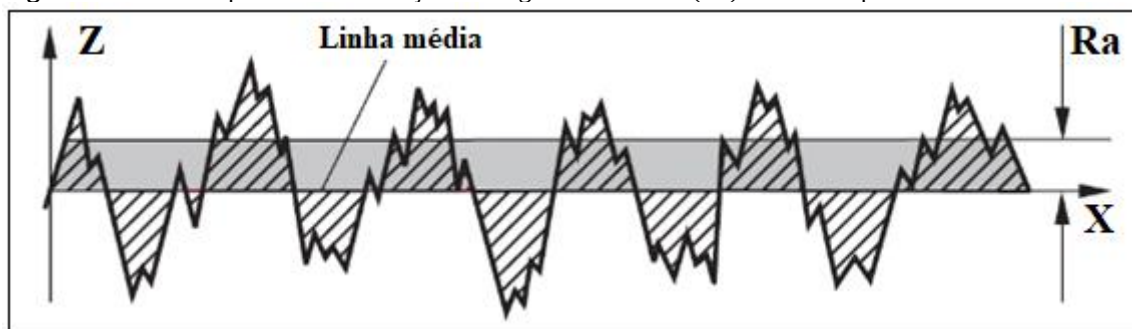
O principal indicador da qualidade da superfície que passa pelo processo de lixamento é a rugosidade (UGULINO; HERNANDEZ, 2018). Segundo Saloni *et. al.*, 2005 trata-se de um dos parâmetros de grande relevância na operação de lixamento, porque é a última operação de usinagem da madeira realizada para melhor a sua aparência (SALCA, 2018).

Têm-se diferentes parâmetros de rugosidade como o R_a , R_z e R_{max} , que são padronizados pela Norma ABNT NBR 4287, sendo o R_a (μm) um dos mais usados como parâmetro de controle dos processos industriais.

4.4.1. Rugosidade Média (R_a): conceito, medição superficial e importância do parâmetro.

O parâmetro R_a (*roughness average*) significa rugosidade média, seu valor representa a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso da medição (l_m). Definindo, trata-se do valor da amplitude média do perfil em relação à linha de referência do percurso da medição na superfície, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 -Perfil do percurso da medição da Rugosidade média (R_a) em uma superfície.



Fonte: MAHR, 2010 adaptado.

Segundo Hecker e Liang (2003) a rugosidade média (R_a) pode ser definida matematicamente por meio da Equação (5):

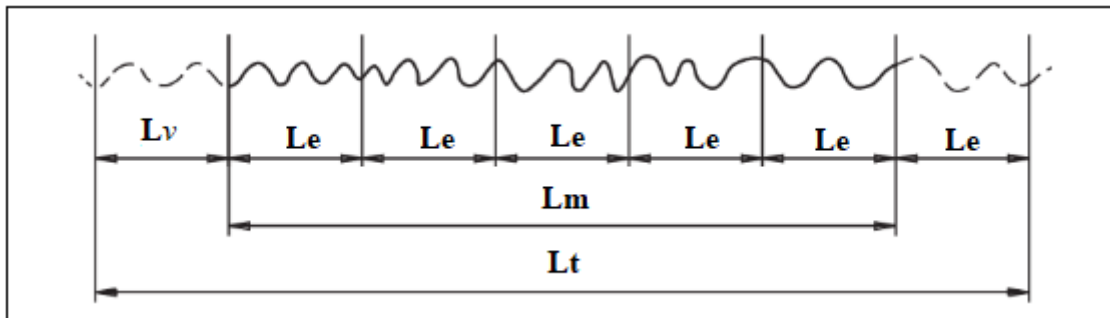


$$R_a = \frac{1}{L} \times \int_0^L |y - y_{CL}| dl \quad (5)$$

Onde: L-Comprimento de medição; y-Altura do pico ou a profundidade do vale; y_{CL} -Variável que define o posicionamento da linha de centro (as áreas localizadas abaixo e acima desta linha são idênticas).

Para obter o valor da rugosidade superficial da peça utiliza-se o instrumento de medição rugosímetro. Há normas responsáveis pela padronização e avaliação da rugosidade por meio do rugosímetro: ABNT NBR 4287/2002, ABNT NBR 4288/2008 e ABNT NBR 6405/1988. Segundo estas normas para determinar a rugosidade de uma superfície é preciso primeiramente determinar o comprimento de amostragem “ L_e ” denominado de comprimento de onda limite λ_c (“*cut-off*”), o qual é formado por trechos menores, “ L_m ” como mostrado na Figura 14.

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



Legenda: **L_e**- comprimento de amostragem (“*cut-off*”); **L_m**- comprimento de avaliação; **L_t**-comprimento total de medição; **L_v**- comprimento para atingir a velocidade de medição do apalpador; **L_n**- comprimento para parada do apalpador. **Fonte:** adaptado NBR 6405/1988.

A rugosidade superficial é avaliada pela média aritmética de uma série consecutiva dos “ L_m ” e os valores de L_v e L_n são descartados após a medição, pois atuam somente nas etapas de aceleração e desaceleração do rugosímetro. O comprimento de amostragem L_e (*cut-off*), que deve ser usado nos aparelhos de medição para o cálculo do R_a é estabelecido pela norma ABNT NBR 6405/1988, descrita na Tabela 4.

**Tabela 4** -Tabela de comprimento de amostragem (“*cut- off*”).

Rugosidade Média Ra (μm)	Mínimo comprimento (le) “ <i>cut-off</i> ” (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10	2,5
Maior que 10,0	8

Fonte: (ABNT – NBR 6405/1998)

Segundo Xavier *et al.* (2017) a rugosidade e o estresse residual são os principais problemas de integridade superficial, afetando não somente a qualidade, mas também a vida útil dos produtos.

Moura *et al.*, 2010 afirmam que valores muito baixos para a rugosidade reduzem a área disponível para adesão nos processos que envolvam colagem. Nesse caso, Cool e Hernandez, 2011 defendem um nível mínimo de rugosidade necessário para melhorar o desempenho do revestimento. Pois, superfícies ásperas que possuem valores elevados de rugosidade dificultam a adesão do revestimento exigindo maior quantidade de produtos, interferindo na qualidade do acabamento (TIRYAKY, 2014).

4.5. POTÊNCIA DE LIXAMENTO

Experimentalmente a potência da usinagem pode ser mensurada durante o processo, por meio da tensão e da corrente elétrica consumida. A tensão pode ser obtida através do uso de voltímetros e para a corrente pode-se utilizar amperímetros em série (MACHADO *et al.*, 2009).

O sensor de potência capta a potência consumida ou a variação da frequência do motor, mensurando a corrente e a tensão gerada. Devido ao fácil manuseio são usados em grade escala para o monitoramento de equipamentos de usinagem (JEMIELNIAK, 1999).

É importante a análise da potência de lixamento, pois quando conhecida é possível otimizar o processo, possibilitando o uso da madeira até o seu máximo rendimento. O seu desempenho pode sofrer influência de diversos fatores como espécie de madeira, densidade, teor de umidade, direcionamento das fibras, velocidade de corte, geometria do grão abrasivo e granulometria da lixa e dentre outros. (VARANDA, 2010).

Stewart (1974) diagnosticou em seu trabalho que a potência de lixamento, correlacionava-se proporcionalmente com a taxa de remoção do material, profundidade



de corte e velocidade de avanço. Décadas mais tarde este resultado fez-se presente no trabalho de Fotin *et al.* (2008), os quais analisaram o consumo de energia no processo de lixamento da madeira do gênero *Birch sp* em relação a diferentes combinações de granulometria, velocidade, profundidade de corte e sentido de lixamento, comprovando que a potência aumentou proporcionalmente com o aumento da velocidade e profundidade de corte. Além de concluir, que o maior consumo de energia foi no lixamento perpendicular às fibras para todas as combinações de lixas.

Fotin *et al.* (2011), também analisaram a potência consumida, variando as granulometrias de 60, 80, 100 e 180 *mesh* em diferentes combinações, nos sentidos, paralelo, perpendicular e no ângulo de 45°. Perceberam que a potência variou conforme o sentido de lixamento e a sequência da granulometria. A sequência 60- 80-100 *mesh* no sentido perpendicular e 60-80-120 *mesh* paralelo, apresentaram maior potência. Enquanto, 60 - 100 - 120 *mesh* perpendicular e 60- 100 *mesh* obtiveram menor potência. Samolej (2006), usinou a madeira *Fagus silvatica* em lixadeira circular, variando as granulometrias de 40, 80 e 120 *mesh*, sentido paralelo e perpendicular com quatro pressões de referência 0,66 - 0,84 - 1,04 e 1,47 N·cm⁻². Conclusão, as variáveis significativas em relação a potência foram a pressão e granulometria, a pressão comportou-se diretamente proporcional à potência e inversamente ao tamanho do grão. Resultados semelhantes as pesquisas de Siklienka e Okajová (2001), Siklienka (2001) e Okajová (1999).

4.6. VIBRAÇÃO DO SISTEMA DE LIXAMENTO

A vibração é um movimento oscilante ou de trepidação de uma máquina ou de algum elemento de máquina, saindo de sua posição de estabilidade (estática ou dinâmica). Todas as máquinas em funcionamento produzem vibrações que ao longo do tempo podem causar ruídos, provocar problemas de segurança e levar à degradação do equipamento e comprometer até mesmo, a qualidade do produto fabricado. (MARÇAL, Rafael A., SANTOS, Ronaldo L. , 2013.)

Estudar a vibração do sistema contribui para o aperfeiçoamento da projeção de maquinários, detectar anomalias prematuras, além de garantir conforto e segurança ao



operador melhorando aspectos ergonômicos em relação ao uso do equipamento (PINHO *et al.*, 2014) (SCHLOSSER *et al.*, 2002).

Para monitorar a vibração do sistema são utilizados sensores denominados de transdutores, sendo os acelerômetros piezoelétricos, os mais comumente usados devido à liberdade de aplicação, visto que o usuário pode escolher entre aceleração, velocidade ou deslocamento como parâmetro de medida (VARASQUIM, 2014) .

A vibração do processo de lixamento pode estar relacionada a diferentes fatores desde as características anatômicas da madeira, granulometria da lixa, ou parâmetros da lixadeira como pressão, velocidade de corte, potência e dentre outros.

No trabalho de Zacarias, 2012 o objetivo principal foi conhecer a influência e a interação das variáveis de entrada: velocidade de corte, de avanço e granulometria de lixa, sobre as variáveis de saída: rugosidade, potência consumida, emissão acústica e vibração, no processo de lixamento tubular da madeira de *Corymbia citriodora*, sendo constatado que todos os fatores tiveram influência significativa sobre a emissão acústica e vibração.

Varasquim (2014) estudou a relação entre os fatores granulometria da lixa, desgaste do abrasivo e tipo do abrasivo no comportamento da potência de lixamento, emissão acústica, vibração, rugosidade e integridade superficial no processo de lixamento das espécies *Corymbia citriodora* e do *Pinus elliottii* . Concluiu que o desgaste da lixa não influenciou a vibração em nenhum dos casos estudados.

Fonseca, 2016 estudou o lixamento plano em duas espécies de madeira, *Pinus elliotti* e *Eucalyptus saligna*, com granulometrias de lixa de 30, 40, 80, 100, 120, 220, 320 e 400 *mesh* de grãos abrasivos de óxido de alumínio para analisar os parâmetros de rugosidade R_a e R_t , temperatura, vibração, emissão sonora e potência consumida. Concluiu que o *Pinus elliotti* apresentou menor vibração quando processado com lixas nas granulometrias 80, 100 e 120 *mesh* no sentido perpendicular às fibras.

4.7. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV

O estudo em microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite a observação de imagens tridimensionais, proporcionando uma melhor identificação da superfície das estruturas, sendo por isso, uma técnica muito versátil e comumente usada para a análise microestrutural de materiais sólidos (PAWLEY, 1997).



Segundo Servidoni, 2012 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 a 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.

A imagem do MEV é de fácil interpretação, pois permite elevada profundidade de foco podendo alcançar uma resolução melhor que 1(nm) nanômetro, podendo revelar informações da natureza da amostra incluindo composição, topografia, potencial eletrostático, campo magnético local e outras propriedades da amostra. Sendo possível então, entender as interações da lixa na superfície da madeira, após o processo de lixamento (HUMPHRIS & HOBBS, , 2005).



5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. SELEÇÃO DOS MATERIAIS: MADEIRAS E LIXAS

Para a realização dos ensaios de lixamento foram utilizadas lixas de óxido de alumínio da marca NORTON SAINT-GOBAIN que foram devidamente climatizadas e acondicionadas para atender as condições ideais de uso, conforme a recomendação da norma ABNT NBR 14960/2003.

Foram escolhidas as espécies de *Pinus elliottii*, originária do sudoeste do estado de São Paulo, idade próxima de 40 anos e diâmetro a altura do peito (DAP) de 50 cm, e do *Corymbia citriodora* provida da região de Bauru, com DAP de 50 cm e idade em torno de 35 anos. O *Corymbia citriodora* obteve-se em seções quadradas na dimensão de 40 x 40 x 1200 mm e o *Pinus elliottii*, em tora.

5.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação do campo amostral foi feita de igual forma para ambas as espécies, evitando influenciar os resultados da pesquisa. Realizou-se em duas etapas: desdobro primário e secundário, somente para o *Pinus elliottii*, acabamento e climatização dos corpos de prova para ambas as espécies.

▪ 1ª Etapa-Desdobro primário e secundário

Através de um desdobro primário da tora de *Pinus elliotti* em uma serra de fita germinada da marca FaberNew modelo SFG - 1100 foi retirado um semi-bloco que passou por um desdobro secundário na serra multilâminas da marca FaberNew, modelo CMB 210, obtendo-se cinco pranchas com as seguintes dimensões: 3500 x 83 x 250 mm que foram enumeradas. Considerando a heterogeneidade da madeira presentes ao longo da seção transversal e longitudinal da madeira, retirou duas ao acaso. Destas, fabricou-se 6 peças em uma resserra da marca FaberNew modelo DRP - 110V2, com a dimensão de 3500 x 83 x 60 mm. E a partir destas 6 peças, confeccionou 12 de 1000 x 30 x 60 mm, as quais foram climatizadas até atingir aproximadamente 15% de umidade de equilíbrio (UE) com o ambiente.



▪ 2ª Etapa- Confeção dos corpos de prova

As peças de *Pinus elliottii* fabricadas na primeira etapa e as já obtidas de *Corymbia citriodora* nas dimensões de 1200 x 40 x 40 mm foram aplainadas na plaina da marca ROCCO modelo PMS 350. E por meio da desgrossadeira marca BALDAN modelo DGR4, reduziram-se largura e espessura, cortando-as em uma esquadrejadeira da marca VERRY modelo LIFE nas dimensões finais de 30 x 54 x 23 mm. Foram feitos 800 corpos de prova de cada espécie.

5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS

A caracterização física das amostras fez-se em termos do teor de umidade e densidades, aparente e básica, determinadas pelo emprego da ABNT NBR 7190/1997 para “classe de umidade 1 - 12% UE”.

5.3.1. Teor de umidade (%)

A umidade das amostras foi obtida por meio do método gravimétrico, seguindo os devidos passos: determinação da massa inicial (m_i) do corpo de prova com precisão de 0,01 g; posto em seguida, na câmara de secagem com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e medindo-se a sua massa a cada 6 h. Isto se fez até ocorrer uma variação entre duas medições consecutivas menor ou igual a 0,5%, sendo a última, referida como massa seca (m_s). E então, através da Equação (6), constatou que a madeira entrou em equilíbrio com ambiente em aproximadamente 12% (UE).

$$U_{(\%)} = \frac{(m_i - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde: $U_{(\%)}$ = porcentagem de umidade base seca; m_i = massa de amostra úmida, em gramas e m_s = massa de amostra seca, em gramas.



5.3.2. Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada através da pesagem da massa do corpo de prova em uma balança com precisão de 0,01 g, sendo mensurado em seguida, seu volume com paquímetro mecânico da marca Mitutoyo com precisão de 0,05mm.

A densidade aparente (D_{ap}) foi calculada usando a Equação (7), definida pela relação entre a massa e o volume do corpo de prova com teor de umidade de 12% (UE).

$$D_{ap(12\%)} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (7)$$

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

5.3.3. Densidade básica

A densidade básica é definida como a relação entre o peso de uma amostra seca em estufa e o seu volume verde ou saturado de água. Para sua precisão, seguiu o método da balança hidrostática. Então, os corpos de prova foram acondicionados em uma caixa com água até a saturação completa. Pesou-os em duas situações, imersos em água (m_i) e saturados (m_v), obtido após remoção da água superficial. Para isto, usou a balança hidrostática com precisão de 0,01g. Em seguida, os corpos de prova foram para câmara de secagem com temperatura máxima de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ até ocorrer à variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida, alcançando a massa seca (m_s). A densidade básica pode ser determinada através da Equação (8).

$$D_b = \frac{m_s}{m_v - m_i} \quad (8)$$

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.



5.4. ESTRUTURA DO SISTEMA DE ENSAIO DE LIXAMENTO

A Figura 15 mostra o banco de ensaio com os seus equipamentos utilizados para realizar os ensaios de lixamento, os quais serão descritos e explicados neste tópico.

Figura 15- Esquema dos componentes da estrutura do banco de ensaios onde realizou os testes de lixamento.



Legenda: lixadeira plana(a) suporte adaptado com um pistão (b) estrutura para afixar as amostras de madeiras para o lixamento (c) painel de lixamento (d), válvula de acionamento VD 3/2(e), uma válvula de comando VD 5/2(f) regulador de pressão (g), filtro(h) e lubrificador (i), sensor de efeito HALL (j) uma fonte de alimentação (l), módulo da vibração(m) bloco de conectores (n). **Fonte:** próprio autor

A estrutura do banco de ensaios foi composta por (a) uma lixadeira plana da marca BALDAN modelo LFH-2, contendo um suporte adaptado com um pistão (b) tendo em sua haste uma estrutura para afixar os corpos de prova de madeiras para o processo de lixamento (c).



Por meio deste suporte, pode-se ter um circuito pneumático para: garantir a altura do material lixado, acionar o pistão responsável por exercer a pressão sobre a peça de 1 kg/ cm², controlar com precisão a velocidade de corte padrão da lixadeira de 12 m/s e a saída da amostra sobre a lixa e garantir 1mm de profundidade de corte. Foram estipulados estes valores para manter os parâmetros constantes e não influenciar na análise estatística dos dados investigados.

O cilindro pneumático foi controlado por meio de um painel de lixamento **(d)**, composto por uma válvula de acionamento 3 vias e 2 posições retorno por mola e acionamento manual **(e)**, uma válvula de comando 5 vias e 2 posições de acionamento pneumático, que controla o movimento de descida e subida do pistão **(f)** e um regulador de pressão **(g)**, ligado ao conjunto formado por um filtro **(h)** e lubrificador **(i)**.

Para a aquisição da potência consumida pelo motor usou um sensor de efeito HALL da marca LEM e modelo AT5B10, construído na forma de alicate e acoplado aos fios do motor. **(j)** A vibração do sistema foi obtida utilizando uma fonte de alimentação da marca SIEMENS com transformador de entrada 110-220 VAC com saída de 24 VCC **(l)**, 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 **(m)**

Utilizou um bloco de conectores NI BNC 2120 e modelo do cabo SHC68-EPM (2m) 192061-02 **(n)** para realizar a interface entre os sinais analógicos enviados pelos sensores e digitais do banco de ensaio e enviá-los para uma placa de aquisição de dados.

O monitoramento e armazenamento dos dados obtidos no processo de lixamento, foi realizado por meio de placa de aquisição de dados da marca NATIONAL INSTRUMENTS, modelo NI PCI 6220, com a função de receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo programa desenvolvido no *software* labVIEW, instalado no microcomputador.

As características técnicas da lixadeira plana, Transdutor de corrente TRX-I/U e Bloco de conector NI BNC 2120 estão na Tabela 5, localizada no final do texto.



Tabela 5- Características técnicas da lixadeira plana, transdutor de corrente e bloco de conector.

Lixadeira plana		Transdutor de corrente TRX-I/U	
Dimensões da mesa	530 x 160mm	Dimensões	45x75x110mm
Diâmetro do disco	250mm	Tensão de alimentação	24 VCC
Rotação do disco de lixa	2580rpm	Corrente de saída	0 – 20 mA
Inclinação da mesa	45°	Tensão de saída	0 – 10VCC
Dimensão da fita	1480 x 150mm	Frequência nominal	50 – 60 Hz
Posição de trabalho	0-90°	Tempo de resposta	250 mS
Potência do motor	1 CV	Temperatura nominal	-5 até +55°C
Peso líquido	78 kg	Temperatura de operação	0-50°C
Bloco de conector NI BNC 2120			
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°C		

Fonte: próprio autor.

5.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os fatores e níveis estipulado no procedimento experimental para analisar o processo de lixamento são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Fatores e níveis estipulados para análise do processo de lixamento

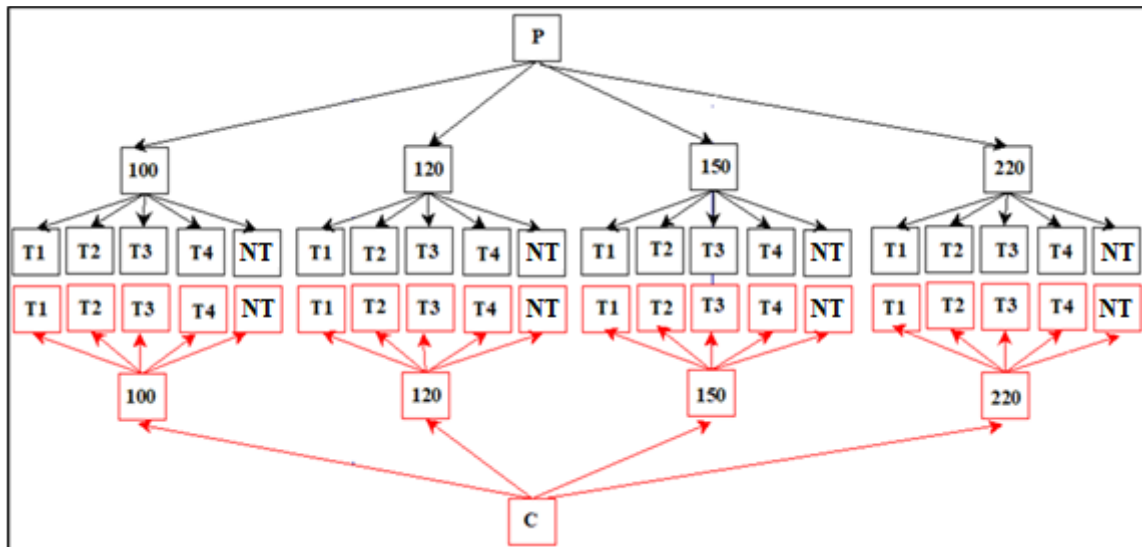
Variáveis	Fatores	Níveis	Símbolo
Lixa	Granulometria	100 mesh	100
		120 mesh	120
		150mesh	150
		220 mesh	220
Madeira	Termorretificadas	80°C	T1
		120°C	T2
		160°C	T3
		200°C	T4
	Não termorretificada	NT	NT
	Espécie	<i>Pinus elliottii</i> <i>Corymbia citriodora</i>	P C

Fonte: próprio autor.



As combinações feitas no experimento fatorial completo são mostradas na Figura 16, em que foi realizado 5 combinações diferentes para cada granulometria, variando a espécie de madeira e sua condição termorretificada e não termorretificada (NT). As combinações foram repetidas três vezes, totalizando em 120 experimentos, cujo objetivo foi simular o efeito da última lixa utilizada para finalizar o acabamento da madeira.

Figura 16- Esquema das combinações dos níveis dos fatores selecionados para análise do processo experimental de lixamento.



Fonte: próprio autor

O tratamento térmico dos corpos de prova do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* procederam de igual forma. As amostras foram acondicionadas em uma estufa a vácuo modelo MARCONI 035/1980, para cada temperatura estipulada de termorretificação por um período de 12 horas.

5.5.1. Medição da Rugosidade média (R_a) e Equacionamento da Potência e vibração do sistema.

Após as amostras passarem pelo processo de lixamento, realizou a medição da rugosidade da superfície com o rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 25+ (Figura 17). Foram realizadas três medições distintas ao longo da superfície da rugosidade média (R_a) para cada amostra processada no banco de ensaio.



Figura 17- Processo de medição da rugosidade.



Fonte: próprio autor.

Estabeleceu nesta pesquisa o Filtro Gaussiano Robusto para o perfil de rugosidade com comprimento de amostragem de 2,5 mm, pois segundo Gurauet *al.* (2006) apud Santiago (2011) o valor de 2,5 mm para superfícies heterogêneas como a madeira minimiza as ondulações que não fazem parte da rugosidade, sem introduzir distorções ou efeito significativo sobre os parâmetros de rugosidade avaliados.

A potência consumida foi obtida em Volts sendo necessário converter a unidade em Ampéres utilizando a Equação (9), a qual foi fornecida pelo fabricante do transdutor, para calcular a potência do lixamento usando Equação (10).

$$I = \frac{U_{cc}}{2} \quad (9)$$

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (10)$$

Substituindo na Equação (10) o valor da tensão de fase do motor da lixadeira (220V) e o fator de potência do motor (0,92), obtêm-se a Equação (11), a qual foi utilizada para obter a potência consumida.

$$P_c = \frac{U_{cc}}{2} \times 220 \times 0,92 \times \sqrt{3} \quad (11)$$

Para conversão do sinal elétrico em vibração (m²/s) usou a Equação (12):

$$v = \frac{U_{cc} \times 25}{10,6} \quad (12)$$

Onde: **I** = corrente (A) ; **U_{cc}** = Tensão de corrente contínua (V) ; **P_c** = potência consumida (W); **U_f** = Tensão de uma das fases (V) , **F_p** = Fator de potência e **v** = vibração (m²/s)



6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. PARÂMETRO DE ANÁLISE: RUGOSIDADE SUPERFICIAL (Ra)

6.1.1. Abordagem comparativa do experimento fatorial completo x método Taguchi das madeiras termorretificadas *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.

▪ **Contextualização:** Nesta etapa serão apresentados a matriz de dados completa dos valores da rugosidade de todas as condições de lixamento obtida por meio da aplicação do experimento fatorial completo, formado por 40 condições (L_{40}) – Tabelas 7 e 8. Ao longo deste tópico serão extraídos desta matriz (L_{40}) diferentes condições de dados, os quais serão analisados em determinadas etapas, sendo nesta especificamente, as que envolvem as madeiras termorretificadas formando uma matriz de dados com 32 condições (L_{32}), sendo está reduzida nas condições propostas pelo método Taguchi, obtendo-se uma matriz com 16 condições (L_{16}) - Tabela 9.

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os valores das medidas descritivas da rugosidade média Ra (μm) das 40 condições de lixamento obtidas por meio do planejamento experimental fatorial completo.



Tabela 7- (PARTE I): Valores descritivos do Ra (μm) em relação a todas às condições de ensaio obtidos como experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do *Corymbia citriodora*

Nº ensaios	Condições do ensaio do lixamento			Média	Variância	Desvio Padrão
	Madeira	Temperatura	Granulometria			
1	<i>C. citriodora</i>	NT	100 mesh	5,80 μm	1,16 μm	$\pm 1,08 \mu\text{m}$
2	<i>C. citriodora</i>	NT	120 mesh	5,98 μm	1,61 μm	$\pm 1,27 \mu\text{m}$
3	<i>C. citriodora</i>	NT	150 mesh	5,89 μm	1,29 μm	$\pm 1,14 \mu\text{m}$
4	<i>C. citriodora</i>	NT	220 mesh	3,89 μm	0,86 μm	$\pm 0,93 \mu\text{m}$
5	<i>C. citriodora</i>	80°C	100 mesh	7,39 μm	1,67 μm	$\pm 1,29 \mu\text{m}$
6	<i>C. citriodora</i>	80°C	120 mesh	6,66 μm	0,87 μm	$\pm 0,93 \mu\text{m}$
7	<i>C. citriodora</i>	80°C	150 mesh	5,17 μm	1,39 μm	$\pm 1,18 \mu\text{m}$
8	<i>C. citriodora</i>	80°C	220 mesh	4,56 μm	0,73 μm	$\pm 0,85 \mu\text{m}$
9	<i>C. citriodora</i>	120°C	100 mesh	7,85 μm	1,46 μm	$\pm 1,21 \mu\text{m}$
10	<i>C. citriodora</i>	120°C	120 mesh	6,55 μm	1,56 μm	$\pm 1,25 \mu\text{m}$
11	<i>C. citriodora</i>	120°C	150 mesh	4,83 μm	0,44 μm	$\pm 0,66 \mu\text{m}$
12	<i>C. citriodora</i>	120°C	220 mesh	5,11 μm	4,84 μm	$\pm 2,20 \mu\text{m}$
13	<i>C. citriodora</i>	160°C	100 mesh	8,14 μm	1,70 μm	$\pm 1,30 \mu\text{m}$
14	<i>C. citriodora</i>	160°C	120 mesh	7,13 μm	2,11 μm	$\pm 1,45 \mu\text{m}$
15	<i>C. citriodora</i>	160°C	150 mesh	5,80 μm	2,69 μm	$\pm 1,64 \mu\text{m}$
16	<i>C. citriodora</i>	160°C	220 mesh	4,53 μm	2,43 μm	$\pm 1,56 \mu\text{m}$
17	<i>C. citriodora</i>	200°C	100 mesh	6,73 μm	1,77 μm	$\pm 1,33 \mu\text{m}$
18	<i>C. citriodora</i>	200°C	120 mesh	7,22 μm	3,68 μm	$\pm 1,92 \mu\text{m}$
19	<i>C. citriodora</i>	200°C	150 mesh	6,92 μm	3,85 μm	$\pm 1,96 \mu\text{m}$
20	<i>C. citriodora</i>	200°C	220 mesh	7,04 μm	4,36 μm	$\pm 2,09 \mu\text{m}$

Fonte: próprio autor *NT= Não termorretrificada

**Tabela 8-** (PARTE II) :Continuação dos valores descritivos do Ra (μm) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do *Pinus elliottii*.

Nº ensaios	Condições do Lixamento			Média	Desvio Padrão
	Madeira	Temperatura	Granulometria		
21	<i>P. elliottii</i>	NT	100 mesh	5,26 μm	$\pm 0,52 \mu\text{m}$
22	<i>P. elliottii</i>	NT	120 mesh	4,91 μm	$\pm 0,98 \mu\text{m}$
23	<i>P. elliottii</i>	NT	150 mesh	4,98 μm	$\pm 0,83 \mu\text{m}$
24	<i>P. elliottii</i>	NT	220 mesh	3,99 μm	$\pm 1,00 \mu\text{m}$
25	<i>P. elliottii</i>	80°C	100 mesh	5,94 μm	$\pm 1,55 \mu\text{m}$
26	<i>P. elliottii</i>	80°C	120 mesh	5,17 μm	$\pm 0,47 \mu\text{m}$
27	<i>P. elliottii</i>	80°C	150 mesh	5,43 μm	$\pm 0,71 \mu\text{m}$
28	<i>P. elliottii</i>	80°C	220 mesh	3,90 μm	$\pm 0,48 \mu\text{m}$
29	<i>P. elliottii</i>	120°C	100 mesh	5,14 μm	$\pm 0,48 \mu\text{m}$
30	<i>P. elliottii</i>	120°C	120 mesh	4,99 μm	$\pm 0,65 \mu\text{m}$
31	<i>P. elliottii</i>	120°C	150 mesh	5,18 μm	$\pm 1,26 \mu\text{m}$
32	<i>P. elliottii</i>	120°C	220 mesh	3,48 μm	$\pm 0,74 \mu\text{m}$
33	<i>P. elliottii</i>	160°C	100 mesh	6,09 μm	$\pm 1,98 \mu\text{m}$
34	<i>P. elliottii</i>	160°C	120 mesh	5,53 μm	$\pm 0,92 \mu\text{m}$
35	<i>P. elliottii</i>	160°C	150 mesh	5,34 μm	$\pm 0,87 \mu\text{m}$
36	<i>P. elliottii</i>	160°C	220 mesh	3,30 μm	$\pm 0,21 \mu\text{m}$
37	<i>P. elliottii</i>	200°C	100 mesh	8,08 μm	$\pm 2,10 \mu\text{m}$
38	<i>P. elliottii</i>	200°C	120 mesh	6,18 μm	$\pm 0,95 \mu\text{m}$
39	<i>P. elliottii</i>	200°C	150 mesh	6,59 μm	$\pm 0,53 \mu\text{m}$
40	<i>P. elliottii</i>	200°C	220mesh	6,04 μm	$\pm 2,59 \mu\text{m}$

Fonte: próprio autor *NT= Não termorretificada

Com a aplicação da metodologia de Taguchi obteve uma matriz de dados com 16 condições de lixamento (L_{16}) apresentada na Tabela 9 com as respectivas medidas descritivas da rugosidade média (Ra).



Tabela 9- Valores descritivos da rugosidade das madeiras termorretificadas $R_a(\mu m)$ em relação às condições de ensaio proposta pela metodologia Taguchi formando uma matriz ortogonal L_{16}

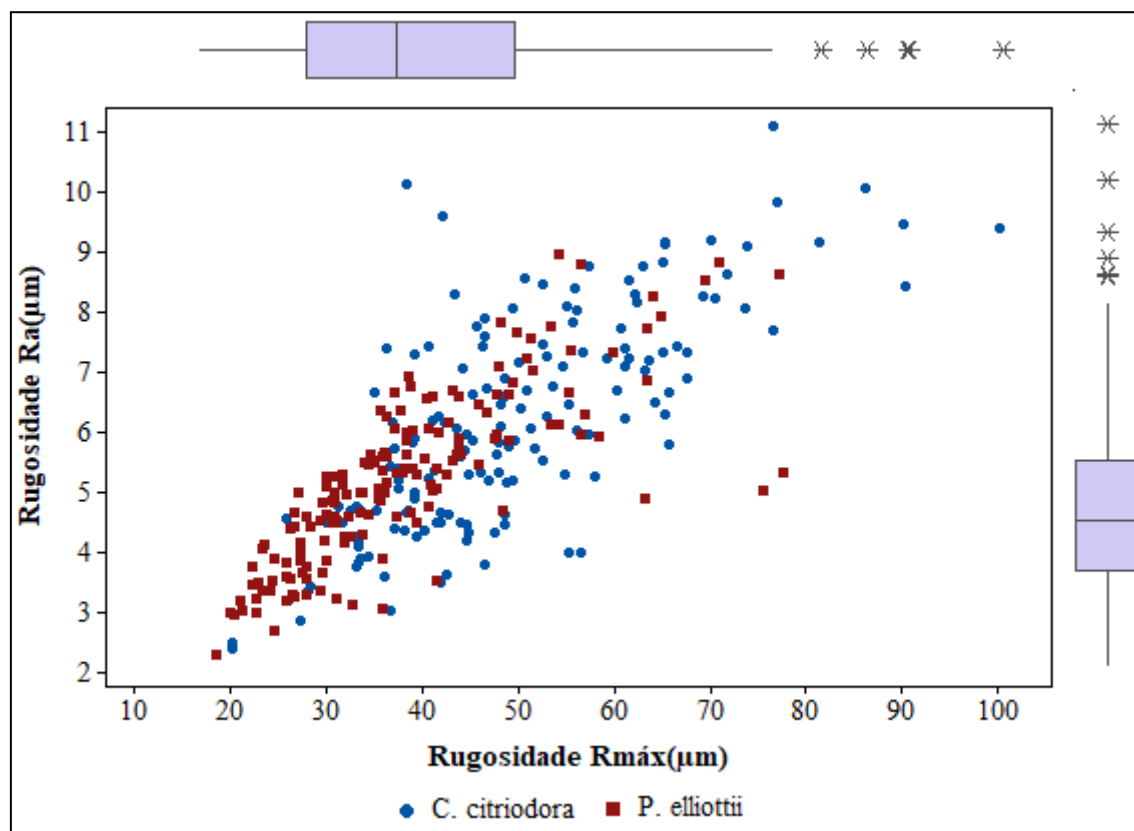
Nº ensaios	Condições do ensaio do lixamento			Média	Desvio Padrão
	Madeira	Temperatura	Granulometria		
1	<i>C. citriodora</i>	80°C	100 mesh	7,39 μm	$\pm 1,29 \mu m$
2	<i>C. citriodora</i>	80°C	120 mesh	6,66 μm	$\pm 0,93 \mu m$
3	<i>C. citriodora</i>	120°C	100 mesh	7,85 μm	$\pm 1,21 \mu m$
4	<i>C. citriodora</i>	120°C	120 mesh	6,55 μm	$\pm 1,25 \mu m$
5	<i>C. citriodora</i>	160°C	150 mesh	5,80 μm	$\pm 1,64 \mu m$
6	<i>C. citriodora</i>	160°C	220 mesh	4,53 μm	$\pm 1,56 \mu m$
7	<i>C. citriodora</i>	200°C	150 mesh	6,92 μm	$\pm 1,96 \mu m$
8	<i>C. citriodora</i>	200°C	220 mesh	7,04 μm	$\pm 2,09 \mu m$
9	<i>P. elliottii</i>	80°C	150 mesh	5,43 μm	$\pm 0,71 \mu m$
10	<i>P. elliottii</i>	80°C	220 mesh	3,90 μm	$\pm 0,48 \mu m$
11	<i>P. elliottii</i>	120°C	150 mesh	5,18 μm	$\pm 1,26 \mu m$
12	<i>P. elliottii</i>	120°C	220 mesh	3,48 μm	$\pm 0,74 \mu m$
13	<i>P. elliottii</i>	160°C	100 mesh	6,09 μm	$\pm 1,98 \mu m$
14	<i>P. elliottii</i>	160°C	120 mesh	5,53 μm	$\pm 0,92 \mu m$
15	<i>P. elliottii</i>	200°C	100 mesh	8,08 μm	$\pm 2,10 \mu m$
16	<i>P. elliottii</i>	200°C	120 mesh	6,18 μm	$\pm 0,95 \mu m$

Fonte: próprio autor

Para ter uma visão completa da distribuição dos dados das Tabelas 7 e 8 foi feito o gráfico de dispersão marginal comparando os valores das rugosidades R_a e $R_{máx}$, das duas espécies de madeiras analisadas, que pode ser visto na Figura 18.



Figura 18 - Gráfico de dispersão marginal realizada com os dados da matriz L₄₀



Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar o comportamento descritivo dos dados das Tabelas 7 e 8, nota-se que para algumas condições a rugosidade não apresentou um comportamento esperado de uma usinagem abrasiva, em que a tendência da rugosidade é diminuir com o aumento da granulometria do abrasivo.

Isto ocorreu devido a variabilidade dos dados que apresentaram *outliers* e dispersão dos valores da rugosidade $Ra(\mu m)$. O motivo deste resultado pode ter influência de diversos fatores, dentre eles a questão anatômica da madeira, sendo mostrado uma indicação disto por conta da maior dispersão dos valores da rugosidade do *Corymbia citriodora* do que o *Pinus elliottii*.

Porém, não se pode justificar os motivos dos resultados das Tabelas 7 e 8 e da Figura 18 sem antes saber se estes fatores analisados são significativos no comportamento da rugosidade, bem como se a média dos valores das condições estabelecidas se diferem entre si. Numericamente e graficamente apresentou diferença entre as condições, no entanto, sem análise dos dados e a utilização de ferramentas estatísticas torna o resultado superficial, assim como a sua discussão.



Por isso fez as seguintes etapas de análise a seguir realizando primeiramente os testes de normalidade e homogeneidade para efetuar a análise de variância (ANOVA) dos dados de ambas as matrizes L_{16} e L_{32} . Isto foi feito para saber quais fatores e suas relações são significativas no comportamento da rugosidade e se o resultado aplicando os diferentes métodos experimentais são iguais ou diferentes entre si.

A matriz L_{32} alcançou às pressuposições de normalidade e homogeneidade, pois *p*-valor do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente 0,3997 e 0,08442, sendo as mesmas também alcançadas para matriz L_{16} , cujos valores foram 0,3737 e 0,2601. O resultado da ANOVA para as matrizes L_{32} e L_{16} estão respectivamente nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10- ANOVA com a matriz L_{32} , experimento fatorial completo com as madeiras termorretificadas

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<i>Mesh</i>	3	173,48	57,826	32,83	0,000***
Temperatura	3	73,04	24,347	13,82	0,000***
Madeira	1	63,66	63,657	36,14	0,000***
<i>Mesh</i> *Temperatura	9	29,39	3,265	1,85	0,059
<i>Mesh</i> *Madeira	3	21,47	7,157	4,06	0,008**
Temperatura*Madeira	3	14,46	4,818	2,74	0,044*
<i>Mesh</i> *Temperatura*Madeira	9	22,10	2,455	1,39	0,191
Erro	250	440,39	1,762		
Total	281	836,19			

Sumário do Modelo: $S = 1,32724$ $R^2 = 47,33\%$ $R^2(\text{aj}) = 40,80\%$ $R^2(\text{pred}) = 32,89\%$

*** Nível de significância: 0`\*\*\*` 0,001`\*\*` 0,01`\*` Mesh(granulometria)

Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 11- ANOVA com a matriz L_{16} , metodologia de Taguchi para as madeiras termorretificadas

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<i>Mesh</i>	3	11,347	3,782	1,58	0,198
Temperatura	3	31,088	10,363	4,33	0,0065**
Madeira	1	42,828	42,828	17,90	0,0005***
<i>Mesh</i> *Temperatura	9	28,085	3,121	1,30	0,243
<i>Mesh</i> *Madeira	3	3,846	1,282	0,54	0,659
Temperatura*Madeira	3	88,685	29,562	12,36	0,0005***
<i>Mesh</i> *Temperatura*Madeira	9	25,711	2,857	1,19	0,306
Erro	112	267,961	2,393		
Total	143	493,983			

Sumário do Modelo: $S = 1,54677$ $R^2 = 45,76\%$ $R^2(\text{aj}) = 30,74\%$ $R^2(\text{pred}) = 10,19\%$

*** Nível de significância: 0`\*\*\*` 0,001`\*\*` Mesh(granulometria)

Fonte: elaborada pelo autor



Ao comparar os resultados das Tabelas 10 e 11 nota-se que para o planejamento fatorial completo todos os fatores de análise foram significativos, porém, com Taguchi somente os fatores madeira e temperatura, cuja relação foi a única significativa, a qual também foi para o método fatorial completo mais a relação madeira e granulometria. Em relação a interação entre os três fatores ambos os métodos mostraram que há relação significativa. Quanto aos valores do sumário do modelo S , R^2 , R^2 (aj) e R^2 (pred), constata-se que S e R^2 foram próximos para ambos os métodos, porém, R^2 (aj) e R^2 (pred), apresentaram valores menores para o método de Taguchi.

_____ Discussão dos Resultados abordando variabilidade dos dados e a ANOVA incluindo os resultados da Matriz de Correlação e Regressão Múltipla

Comparando os resultados das Tabelas 10 e 11 constatou-se que a interpretação da ANOVA divergiu-se entre os métodos somente segundo a significância do fator granulometria e da relação entre os fatores granulometria e madeira, os quais foram significativos para o experimento fatorial completo, porém para Taguchi não.

Quanto aos valores do sumário do modelo interpreta-se que a ANOVA obtida por meio do experimento fatorial completo apresentou maior precisão do modelo, pois quanto menor o valor de S , melhor o modelo descreve a resposta e quanto mais alto o R^2 , também conhecido como coeficiente de determinação, mais explicativo é o modelo, porque melhor ajusta-se aos dados. Além disso, o R^2 predito foi mais elevado, cujo valor foi aproximadamente três vezes mais do que o apresentado pelo método Taguchi, mostrando uma melhor capacidade preditiva dos resultados.

Com o método Taguchi obteve-se o R^2 predito substancialmente menor que o R^2 , podendo indicar que o modelo está com excesso de ajuste, e isto ocorre quando adicionam-se termos para efeitos que não são importantes, então o modelo se adapta aos dados e, por conseguinte, pode não ser útil para fazer previsões em relação a rugosidade. Isto mostra que a redução do número de observações, proposta pela metodologia Taguchi pode diminuir o poder preditivo do modelo, além de não considerar possíveis relações significativas no processo de lixamento.

Mesmo assim, os dois modelos apresentaram que a integração dos fatores estipulados no experimento não é significativa no comportamento da rugosidade,



resultado consequente de um baixo valor preditivo que esta intrinsecamente relacionado com os resultados presentes na matriz de correlação, formada com a matriz de dados de ambos os métodos, como mostra a Tabela 12, abaixo.

Tabela 12- Resultado dos coeficientes dos fatores analisados obtidos pela matriz de correlação.

Métodos	Madeira	Temperatura	Granulometria
Fatorial Completo (L₃₂)	2,70e-03	2,30e-01	-0,42
Taguchi (L₁₆)	-0, 30	0, 11	0, 07

Analisando a Tabela 12 nota-se que ambos os métodos mostraram coeficiente com baixa intensidade em relação ao valor da rugosidade, influenciando nos resultados de significância das relações e no valor preditivo do modelo.

Além disso, percebe-se que os métodos diferiram na interpretação, pois segundo o fatorial completo, a correlação da madeira e temperatura foi ínfima, mas a granulometria mostrou relação moderada e inversa, ou seja, com o aumento da granulometria ocorre a diminuição do valor da rugosidade. Enquanto, para o método de Taguchi o fator madeira apresentou maior intensidade dentre os demais, porém com relação fraca e inversa, ou seja, uma espécie de madeira apresenta rugosidade maior, enquanto outra menor. Por isso, mesmo sendo os coeficientes de baixa intensidade fez a análise de regressão múltipla com a matriz L₃₂ e L₁₆ para quantificar o impacto percentual que os fatores em conjunto afetam na rugosidade. O resumo do modelo é fornecido nas Tabela 13 e 14 a seguir.

Tabela 13- Coeficientes estimados e resumo do modelo de regressão L₃₂

Variáveis	Coeficientes estimados	Erro padrão	Valor de t	Nível de significância
Intercepto	8,01347	0,37795	21,202	<2e-16***
Granulometria	-0,69672	0,07581	-9,190	<2e-16***
Temperatura	0,38195	0,07538	5,067	7,39e-07***
Madeira	-0,93000	0,16806	-5,534	7,24e-08***
R ² múltiplo	0,3381			
R ² Ajustado	0,3309			
Erro padrão do resíduo	1,411	G.L 278		
Estatística F	47,32	p valor =2,2e-16		

*** significativo a 0%



Tabela 14- Coeficientes estimados e resumo do modelo de regressão L_{16}

Variáveis	Coeficientes estimados	Erro padrão	Valor de t	Nível de significância
Intercepto	6,9462	0,6676	10,405	$<2e-16^{***}$
Granulometria	0,1230	0,1324	0,929	0,354427
Temperatura	0,1731	0,1324	1,307	0,193381
Madeira	-1,0988	0,2961	-3,711	0,000297 ***
R^2 múltiplo	0,106			
R^2 Ajustado	0,0868			
Erro padrão do resíduo	1,776	G.L 140		
Estatística F	5,531	p valor =0,001284		

*** significativo a 0%

Comparando os resultados das Tabelas 13 e 14 nota-se que todos os fatores foram significativos com a aplicação do experimento fatorial completo, e a interação destes foram responsáveis por explicar 33,09% do comportamento da rugosidade no processo de lixamento e dentre este percentual de contribuição o fator madeira é o que mais influência no valor da rugosidade. Enquanto o resultado proveniente da aplicação do método de Taguchi, mostrou que o único fator significativo é a madeira, sendo ela responsável por explicar 10,6% do comportamento da rugosidade no processo de lixamento. Logo, para ambos os métodos a madeira foi o fator que mostrou maior percentual de influência no valor da rugosidade.

▪ **Análise da relação dos fatores: madeira x granulometria da lixa**

Segundo o resultado da Tabela 10 com aplicação do método experimental fatorial completo existe relação significativa entre os fatores madeira e granulometria da lixa, por isso foi feito o gráfico de interação da Figura 19 juntamente com o teste de *Tukey* da Tabela 15, para saber quais médias da rugosidade se diferem estatisticamente em relação às condições dos fatores estabelecido.



Figura 19 - Gráfico de interação entre os fatores madeira e granulometria formados com a matriz L₃₂

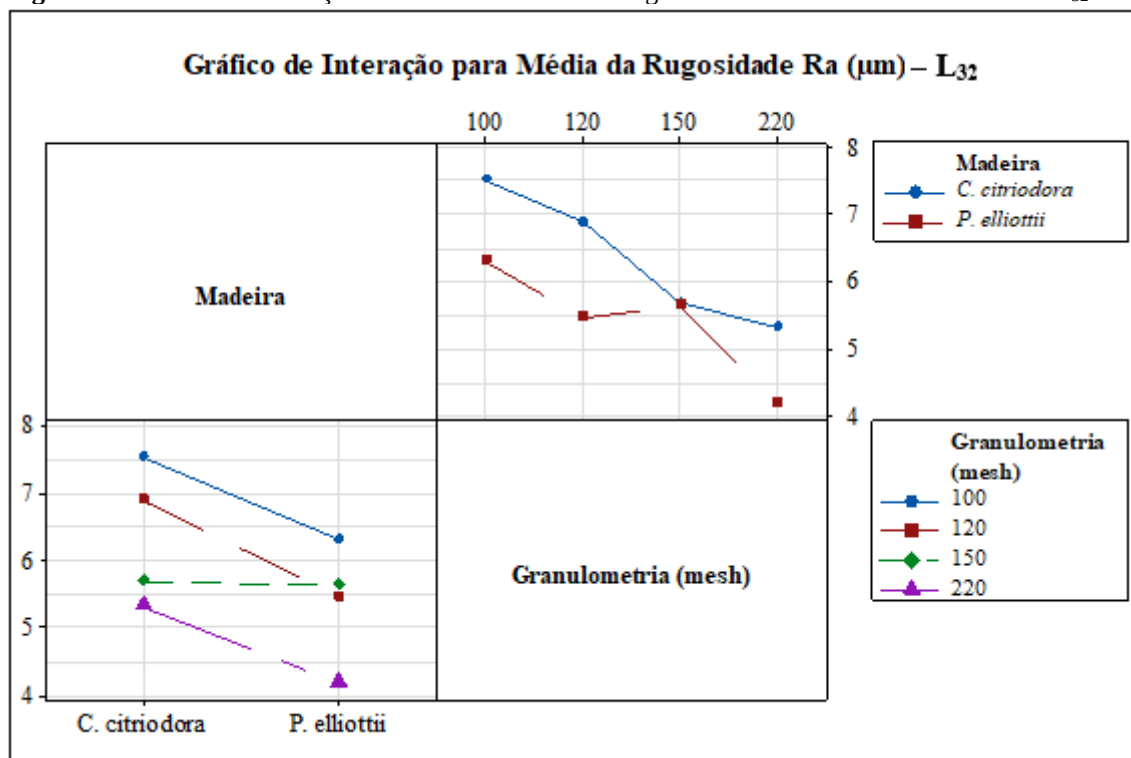


Tabela 15 -Informações de agrupamento usando método de *Tukey* e Confiância de 95% para a relação granulometria da lixa e espécies de madeira L₃₂

Granulometria*Madeira	N	Média	Agrupamento		
100 mesh <i>Corymbia citriodora</i>	34	7, 51722	A		
120 mesh <i>Corymbia citriodora</i>	36	6, 89306	A	B	
100 mesh <i>Pinus elliottii</i>	35	6, 16642		B	C
150 mesh <i>Corymbia citriodora</i>	36	5, 68228			C D
150 mesh <i>Pinus elliottii</i>	36	5, 63333			C D
120 mesh <i>Pinus elliottii</i>	36	5, 46711			C D
220 mesh <i>Corymbia citriodora</i>	34	5, 16075			D
220 mesh <i>Pinus elliottii</i>	35	4, 17942			E

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Por meio da interpretação gráfica da Figura 19 complementada pelas informações da Tabela 15, têm-se as seguintes considerações:

a) Analisando o comportamento gráfico observa-se que há o cruzamento de retas entre os fatores madeira e granulometria, mostrando indícios de uma relação significativa entre estes, que foi confirmada pela análise de variância resultado da Tabela 10. Nota-se que a maioria das retas são inclinadas, e quanto mais acentuada a reta maior é a força da interação entre os fatores. A única condição que mostrou retas paralelas, portanto baixa



interação foi a condição da lixa de 150 *mesh*, e isto foi confirmado pelo teste de *Tukey* que comprovou que o valor da rugosidade do *Corymbia citriodora* e do *Pinus elliottii* não se difere estatisticamente quando processadas com esta granulometria.

b) O *Corymbia citriodora* mostrou um comportamento inversamente proporcional da rugosidade em relação à granulometria, ou seja, quanto maior a granulometria menor a rugosidade da madeira. No entanto, pelo teste de *Tukey*, as lixas de 100 e 120 *mesh*, produzem o mesmo valor da rugosidade, assim como as lixas de 150 *mesh* e 220 *mesh*.

c) O *Pinus elliottii* tendeu a mostrar o mesmo comportamento que o *Corymbia citriodora*, ou seja, em que a granulometria da lixa é inversamente proporcional ao valor da rugosidade, mas a lixa de 150 *mesh* proporcionou um aumento da rugosidade, ao invés de diminuir. Entretanto, o teste de *Tukey* mostrou que a lixa de 120 e 150 *mesh* produzem o mesmo valor de rugosidade e isto pode ser visualizado graficamente, pela aproximação dos pontos do valor da rugosidade nestas condições da lixa.

d) Mesmo sendo madeiras diferentes pode-se observar pelo teste de *Tukey* que houve condições em que a média da rugosidade foram iguais independente da granulometria da lixa, no caso, 100 *mesh Pinus elliottii* e 120 *mesh Corymbia citriodora*, 100 *mesh Pinus elliotti* e 150 *mesh Corymbia citriodora*, 120 *mesh Pinus elliotti* e 220 *mesh Corymbia citriodora*.

_____ Discussão dos Resultados: Gráfico de interação e Teste de *Tukey* em relação aos fatores madeira x granulometria

Por meio do resultado do teste de *Tukey* pode-se observar que no processo de lixamento do *Corymbia citriodora* obteve apenas dois valores médios da rugosidade porque as lixas de 100 e 120 *mesh* produziram o mesmo acabamento superficial, assim como as lixas de 150 e 220 *mesh*. Enquanto o *Pinus elliottii* apresentou três valores, pois as lixas de 100 e 220 *mesh* se diferiram estatisticamente em relação ao valor da média da rugosidade enquanto as de 120 e 150 *mesh* não.

Analisando o resultado pelo prisma estatístico, o motivo do teste de *Tukey* apresentar um número considerável de igualdade entre as médias da rugosidade pode ser explicado devido à baixa intensidade de correlação dos fatores no comportamento da rugosidade.



O fato do *Pinus elliotti* apresentar três valores de médias de rugosidades diferentes, enquanto o *Corymbia citriodora* dois, pode ser justificado devido ao *Pinus elliotti* ser uma madeira de baixa densidade que mesmo termorretificada proporciona menor resistência mecânica a ação do grão abrasivo, proporcionando por isso maior variabilidade quanto ao perfil de rugosidade. Enquanto o *Corymbia citriodora* apresenta maior resistência mecânica dificultando, portanto, a ação do corte do abrasivo e gerando seu maior desgaste ao longo do lixamento, sendo esta, uma explicação das médias da rugosidade serem iguais com as lixas de 150 e 220 mesh.

▪ **Análise da relação dos fatores: madeira x temperatura de termorretificação no comportamento da rugosidade (Ra)**

Para ambos os métodos a análise de variância Tabelas 10 e 11, mostrou relação significativa entre os fatores madeira e temperatura de termorretificação, portanto, foi feito o gráfico de interação para ambas as matrizes, L_{32} e L_{16} , a fim de analisar o comportamento da rugosidade em relação aos fatores e comparar sua média através da aplicação do teste de Tukey, também realizado para cada matriz de dados.

Figura 20 - Gráfico de Interação da rugosidade média Ra (μm) entre os fatores madeira e temperatura com a matriz de dados L_{32}

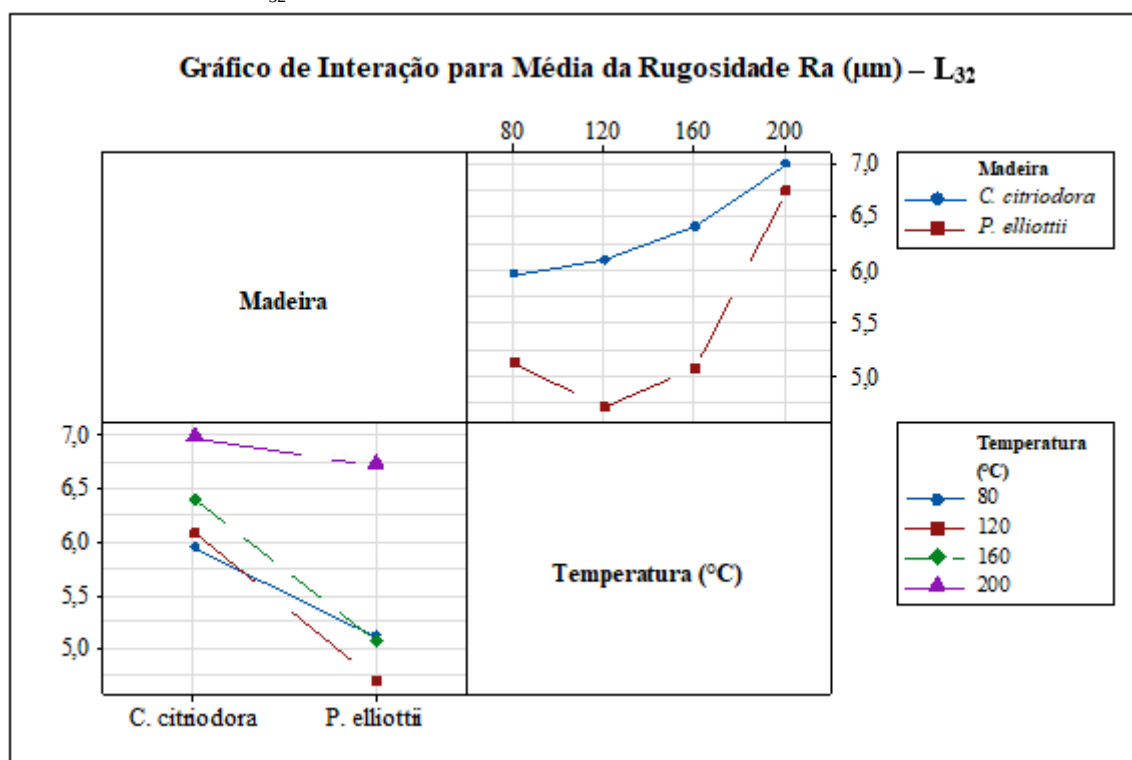




Tabela 16 - Informações de agrupamento usando método de *Tukey* e confiança de 95% dos dados da matriz L_{32} analisando a relação entre os fatores temperatura de termorretificação e madeira

Temperatura*Madeira	N	Média	Agrupamento	
200°C <i>Corymbia citriodora</i>	34	6,82881	A	
200°C <i>Pinus elliottii</i>	35	6,57467	A	
160°C <i>Corymbia citriodora</i>	35	6,39210	A	
120°C <i>Corymbia citriodora</i>	36	6,08583	A	
80°C <i>Corymbia citriodora</i>	35	5,94656	A	B
80°C <i>Pinus elliottii</i>	36	5,10950		B C
160°C <i>Pinus elliottii</i>	35	5,06376		B C
120°C <i>Pinus elliottii</i>	36	4,69836		C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Por meio da análise gráfica da Figura 20 e Tabela 16, têm-se as seguintes considerações a respeito dos resultados da matriz L_{32} , proveniente do experimento fatorial completo:

- Graficamente as madeiras termorretificadas a 200°C possuem valores próximos da rugosidade, tendendo ao paralelismo da reta. Tal comportamento gráfico é complementado pelo teste de *Tukey*, o qual mostrou não haver diferença significativa entre as médias da rugosidade quando termorretificadas nesta temperatura, assim como, na temperatura de 80°C.
- O comportamento gráfico da rugosidade do *Corymbia citriodora* apresentou uma relação diretamente proporcional à temperatura, porque conforme houve o aumento da temperatura o valor da rugosidade também aumentou. No entanto, o teste de *Tukey* informou que independente do gradiente de temperatura de termorretificação da madeira a rugosidade é a mesma.
- O comportamento gráfico da rugosidade do *Pinus elliotti* tendeu ao mesmo do *Corymbia citriodora*, ou seja, aumentar o valor da rugosidade conforme o aumento da temperatura, porém o valor da rugosidade mostrou-se próximo nas temperaturas de 80 e 160°C, e pela confirmação do teste de *Tukey*, tais valores não se diferem estatisticamente, assim como, quando termorretificado a 120°C. Sendo, portanto, a madeira termorretificada a 200°C a única condição que se difere estatisticamente das demais em relação ao valor da média da rugosidade.
- O *Corymbia citriodora* apresentou valores da rugosidade maiores que o *Pinus elliottii* quando termorretificadas em todas as temperaturas analisadas. Porém, o resultado



de Tukey mostrou que em certas temperaturas não há diferença estatística entre as médias, no caso, o *Pinus elliottii* a 200°C possui valor da rugosidade igual às termorretificadas a 80, 120, 160 e 200°C do *Corymbia citriodora*, e a madeira termorretificada a 80°C do *Corymbia citriodora* produz valores iguais a 80 e 160°C do *Pinus elliottii*.

A seguir têm-se o gráfico de interação e o resultado do teste de Tukey realizado com a matriz de dados L₁₆ obtida pelo planejamento experimental de Taguchi.

Figura 21 - Gráfico de Interação da rugosidade média Ra (µm) entre os fatores madeira e temperatura com a matriz de dados L₁₆ formada com aplicação do método de Taguchi.

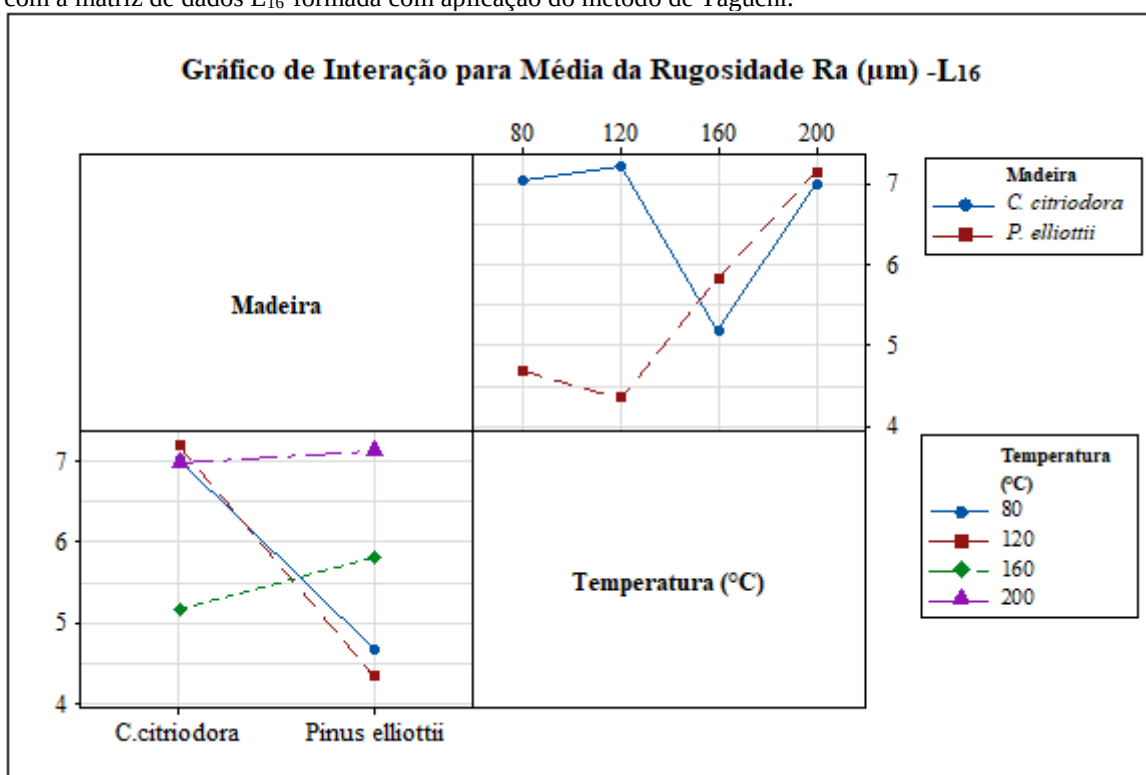


Tabela 17- Informações de agrupamento usando método de Tukey e confiança de 95 dos dados da matriz L₁₆ analisando a relação entre os fatores temperatura de termorretificação e madeira

Temperatura*Madeira	N	Média	Agrupamento		
120°C C.citriodora	18	7, 56675	A		
200°C P.elliottii	18	7, 15962	A		
80°C C.citriodora	17	6, 94288	A	B	
200°C C.citriodora	18	6, 37688	A	B	C
160°C C.citriodora	19	5, 49313		B	C D
160°C P.elliottii	17	5, 43870		B	C D
80°C P.elliottii	19	5, 11875			C D
120°C P.elliottii	18	4, 27250			D

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.



Por meio da análise da Figura 21 e da Tabela 17, têm-se as seguintes considerações a respeito dos resultados da matriz de dados L_{16} , formada pela aplicação do método Taguchi:

- a) Quando as madeiras estão termorretificadas a 200°C, estas apresentam valores próximos da rugosidade, tendendo a um paralelismo da reta, e tal comportamento gráfico é complementado pelo teste de *Tukey*, o qual mostrou que não há diferença significativa entre as médias da rugosidade das madeiras quando termorretificadas nesta temperatura, assim como na temperatura de 160°C.
- b) O *Corymbia citriodora* apresentou valores próximos da rugosidade, tendeu a um paralelismo da reta, indicando uma relação não significativa em relação à temperatura de termorretificação, porém, houve uma diminuição abrupta da rugosidade na temperatura de 160°C, interrompendo a tendência do paralelismo. Sendo constatado pelo teste de *Tukey* que não existe realmente diferença significativa entre os valores da média da rugosidade quando termorretificada a 80, 120 e 200°C, somente na temperatura de 160°C.
- c) O *Pinus elliottii* apresentou uma relação diretamente proporcional à temperatura, porque conforme houve o seu aumento o valor da rugosidade também aumentou. Mas, segundo o resultado do teste de *Tukey* a média da rugosidade é igual quando termorretificada a 80 e 120°C.

_____ Discussão dos Resultados: Gráfico de interação e teste de *Tukey* em relação aos fatores madeira x temperatura de termorretificação

Nota-se que houve diferença em relação ao comportamento gráfico e do teste de *Tukey* entre ambos os métodos, pois Taguchi não projetou uma tendência do comportamento gráfico igual à do experimento fatorial completo e gerou mais agrupamento, apresentando mais condições de lixamento com valores da média da rugosidade iguais entre si.

Tal resultado está relacionado com o poder preditivo da metodologia Taguchi ter sido menor em relação ao experimento fatorial completo, consequência da redução do campo amostral, eliminando assim, padrões em relação ao comportamento da rugosidade. Devido a isto, será considerado os resultados entre a relação dos fatores madeira e



temperatura de termorretificação da matriz L_{32} , obtida pelo experimento fatorial completo.

Por meio do resultado da Tabela 16 tem-se que o *Corymbia citriodora* não diferiu a média da rugosidade em relação à mudança do gradiente de temperatura de termorretificação. Enquanto o *Pinus elliottii*, quando termorretificado a 200°C produziu acabamento superficial diferente em relação às demais temperaturas da própria espécie. Isto pode ter ocorrido, devido a diminuição significativa da resina da madeira nesta temperatura, facilitando a remoção do material.

O fato de haver poucas condições que se diferiram em relação à média da rugosidade, constata a influência da baixa intensidade da correlação da temperatura de termorretificação no valor da rugosidade superficial. Portanto, possivelmente as diferenças que ocorreram entre as condições, foram devidas as questões anatômicas da madeira.

- **Investigação sobre a relação dos fatores: granulometria da lixa x temperatura de termorretificação, incluindo a análise separada do comportamento da rugosidade para o *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.**

A relação dos fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação não foi significativa para ambas as matrizes L_{32} e L_{16} dos métodos aplicados. Porém, o resultado da regressão múltipla constatou que o fator madeira foi o que apresentou maior interferência no comportamento da rugosidade, isto para os dois métodos. Por isso, foi feito a ANOVA especificamente para as condições de lixamento do *Corymbia citriodora* e do *Pinus elliottii*, para saber se a granulometria da lixa é um fator significativo ou não para as madeiras.

Para a investigação da relação dos fatores utilizou a matriz obtida pelo experimento fatorial completo L_{32} , separando as condições entre as madeiras, formando, portanto, uma matriz L_{16} . Primeiramente foi feito as pressuposições da normalidade e homogeneidade, as quais foram alcançadas para o *Corymbia citriodora*, pois *p*-valor do Shapiro-Wilk e Fligner-Killeen foram 0,2731 e 0,08997 e para o *Pinus elliottii* também com *p*-valor do Shapiro-Wilk e Fligner-Killeen respectivamente de 0,509 e 0,07685,



sendo no entanto, necessário para alcançar tais pressuposições a retirada de *outliers*. As Tabelas 18 e 19 apresentam os resultados da ANOVA para cada espécie de madeira.

Tabela 18- Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (Ra) do experimento fatorial completo L₁₆ do processo de lixamento do *Corymbia citriodora*.

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Temperatura	3	22,66	7, 552	3,40	0, 020*
Granulometria	3	115,50	38, 500	17,33	0, 000***
Temperatura *Granulometria	9	51,14	5, 682	2,56	0, 010**
Erro	128	284,33	2, 221		
Total	143	473,62			

Sumário do Modelo: S= 1,49041 R² = 39,97% R²(aj) =32,93% R²(pred)= 24,02%

Nível de significância: 0`\*\*\*\*` 0,001`\*\*` 0,01`\*` - Temperatura (madeira termorretificada)

Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 19- Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (Ra) do experimento fatorial completo L₁₆ do processo de lixamento do *Pinus elliottii*

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Temperatura	3	72,65	24, 216	18,36	0, 000***
Granulometria	3	75,86	25, 287	19,18	0, 000***
Temperatura*Granulometria	9	13,42	1, 491	1,13	0, 346
Erro	127	167,48	1, 319		
Total	142	327,19			

Sumário do Modelo: S= 1,49041 R² = 48,81% R²(aj) =42,77% R²(pred)= 35,09%

Nível de significância: 0`\*\*\*\*` Temperatura (madeira termorretificada)

Fonte: elaborada pelo autor

Analisando as Tabelas 18 e 19 interpreta-se que o comportamento da rugosidade do *Corymbia citriodora* é influenciado pela relação dos fatores granulometria e temperatura. Porém, para o *Pinus elliottii* não é significativa, ou seja, a combinação dos níveis estipulados entre os fatores na pesquisa não influencia no comportamento da rugosidade, não havendo diferença entre os mesmos no valor da média da rugosidade.

Sabendo da relação significativa destes fatores para o *Corymbia citriodora* foi feito o gráfico de interação entre estes, juntamente com o teste de *Tukey* para complementar o resultado para analisar o comportamento da rugosidade.



Figura 22 - Gráfico de interação do *C.citriodora* obtidos pela matriz L₁₆ do experimento fatorial completo.

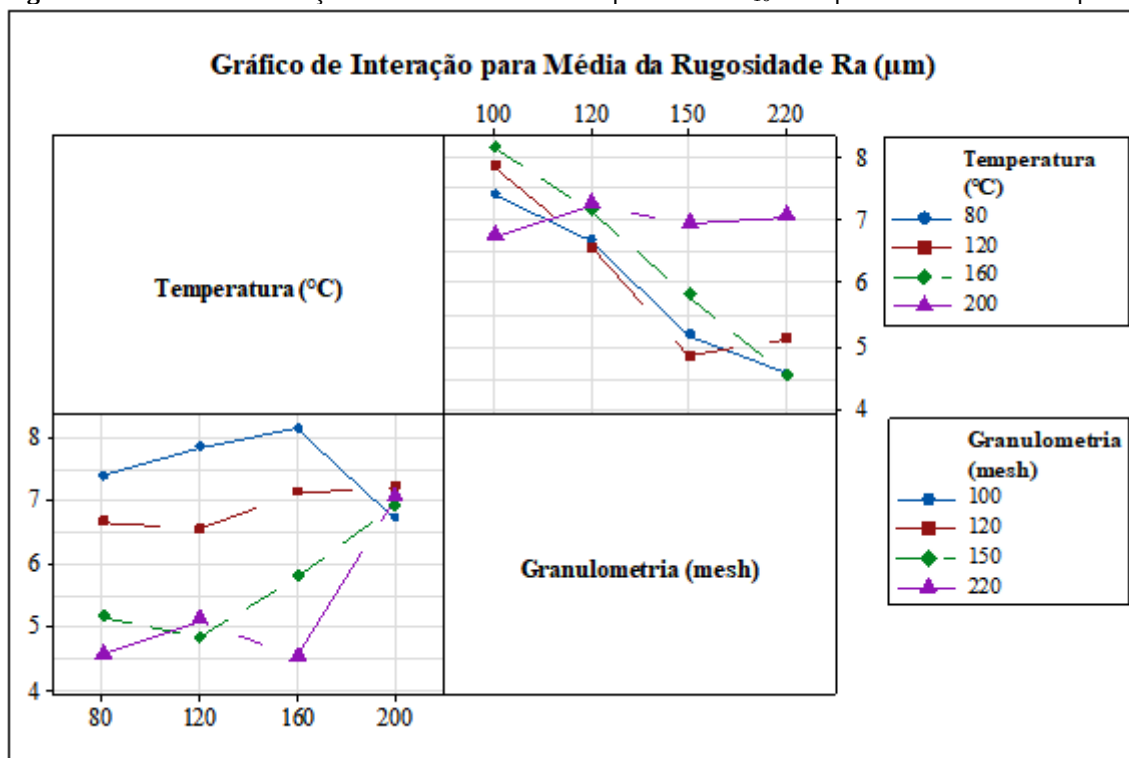


Tabela 20- Resultado de *Tukey* do *C. citriodora* entre os fatores temperatura e granulometria da lixa

Temperatura*Granulometria	N	Média	Agrupamento
160°C * 100 mesh	9	8, 14111	A
120 °C*100 mesh	9	7, 84889	A
80 °C *100 mesh	9	7, 39111	A B
200 °C*120 mesh	9	7, 22222	A B C
160°C* 120 mesh	9	7, 13889	A B C
200°C* 220 mesh	9	7, 03778	A B C
200 °C*150 mesh	9	6, 92444	A B C D
200 °C*100 mesh	9	6, 73000	A B C D
80°C*120 mesh	9	6, 66222	A B C D
120 °C* 120 mesh	9	6, 54889	A B C D
160°C* 150 mesh	9	5, 79689	A B C D
80 °C* 150 mesh	9	5, 17333	B C D
120°C* 220 mesh	9	5, 11111	B C D
120°C* 150 mesh	9	4, 83444	C D
80°C* 220 mesh	9	4, 56444	D
160°C* 220 mesh	9	4, 52889	D

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.



Por meio da análise da Figura 22 e da Tabela 20 têm-se as seguintes considerações:

- a) Graficamente há interação entre os fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação devido ao cruzamento das linhas, e por não serem paralelas, exceto a linha da granulometria de 200 *mesh* que tendeu a uma constância dos valores da rugosidade independente da temperatura de termorretificação da madeira. Este resultado foi complementado pelo teste de *Tukey* que mostrou não haver diferença entre as médias da rugosidade termorretificada a 200°C com lixas na granulometria de 100, 120, 150 e 220 *mesh*.
- b) Dentre as temperaturas a que mostrou maior inclinação da reta foi à madeira termorretificada a 160 °C, apresentando portanto maior magnitude do efeito principal, no entanto, pelo resultado do teste de *Tukey* o valor médio da rugosidade não se difere quando processada com lixas de granulometrias de 100, 120 e 150 *mesh*, somente com a lixa de 220 *mesh*, a qual produz a menor rugosidade.
- c) A madeira termorretificada a 120°C tendeu a diminuir o valor da rugosidade com o aumento da granulometria da lixa, exceto com a lixa de 220 *mesh* que produziu uma superfície com maior rugosidade do que a de 150 *mesh*. No entanto, o resultado de *Tukey* informa que não há diferença significativa do valor médio da rugosidade, quando processadas com lixas de 100 e 120 *mesh* e 120, 150 e 220 *mesh*.
- d) A madeira termorretificada a 80°C tendeu a diminuir o valor da rugosidade com o aumento da granulometria, porém o resultado de *Tukey* informou que o valor da média da rugosidade não se difere quando processadas com as lixas de 120, 150 e 220 *mesh*, sendo diferente apenas com a lixa de 100 *mesh*.

_____ Discussão dos Resultados: Gráfico de interação e Teste de *Tukey* em relação aos fatores granulometria da lixa x temperatura de termorretificação para o *Corymbia citriodora* .

Por meio dos resultados do teste de *Tukey* foi possível notar que houve um considerável número de igualdade entre as médias da rugosidade do *Corymbia citriodora* para mesma temperatura de termorretificação quando processado com lixas de



granulometrias diferentes. Sendo que a madeira termorretificada a 200°C pode ser lixada com quaisquer granulometrias dentre as lixas, 100, 120, 150 e 220 *mesh* que o valor médio da rugosidade será igual. Além disso, este resultado revelou que nesta temperatura de termorretificação a madeira torna-se mais resistente mecanicamente a ação do grão abrasivo, o fazendo desgastar mais rapidamente.

A quantidade significativa de condições que não se diferiram estatisticamente em relação à média da rugosidade, pode ser explicada devido o resultado da matriz de correlação entre estes fatores apresentarem valor baixo.

▪ Gráfico de efeitos principais – abordagem comparativa entre os métodos de Taguchi e experimento fatorial completo

Foi feito o gráfico de efeitos principais para analisar graficamente a resposta média para cada nível dos fatores da matriz L_{32} (Figura 23) e L_{16} (Figura 24) com a aplicação do sinal-ruído (S/N) (Figura 25)

Figura 23 - Gráfico de efeitos principais do comportamento da rugosidade $Ra(\mu m)$ em relação aos fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação da matriz L_{32} , obtida pelo experimento fatorial completo.

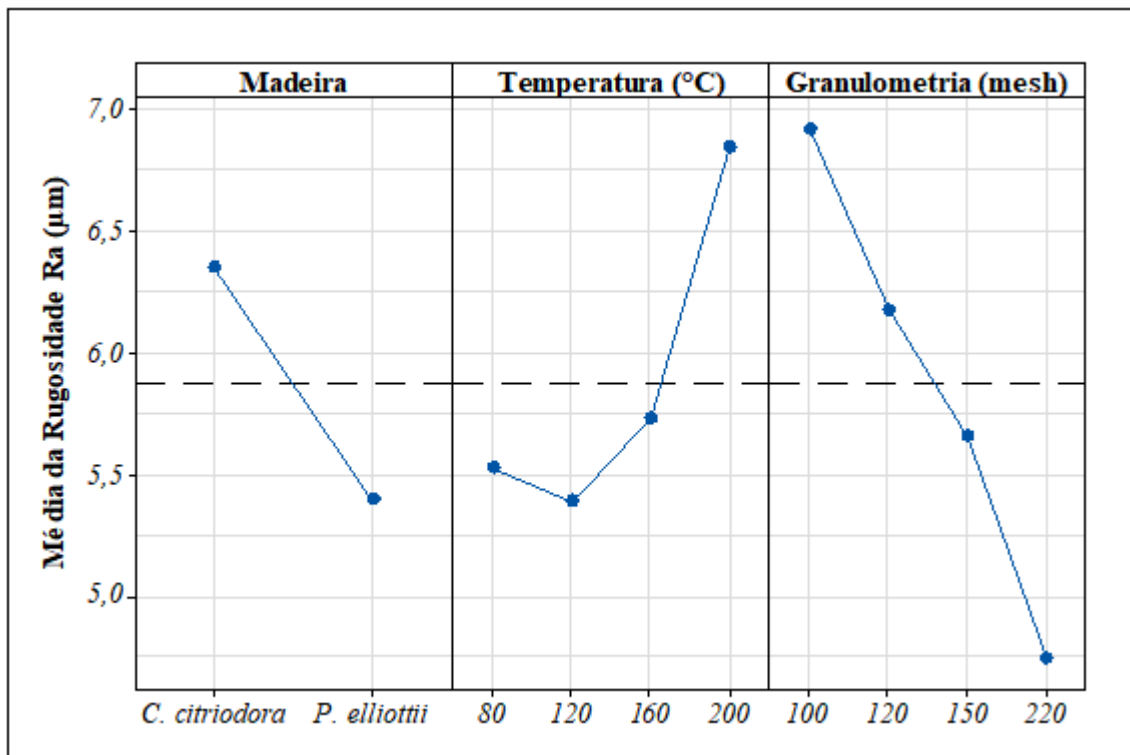




Figura 24 - Gráfico de efeitos principais do comportamento da rugosidade $Ra(\mu m)$ em relação aos fatores granulometria da lixa e temperatura de termoretificação da matriz L_{16} , obtida pelo método de Taguchi

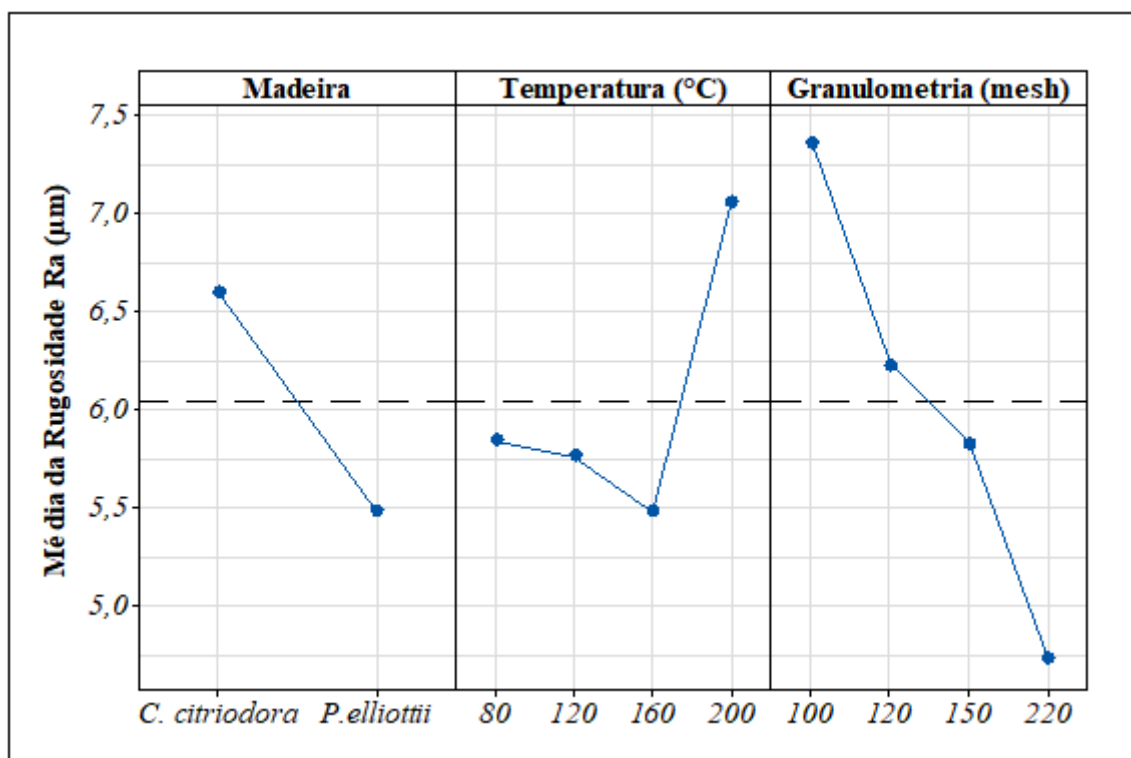
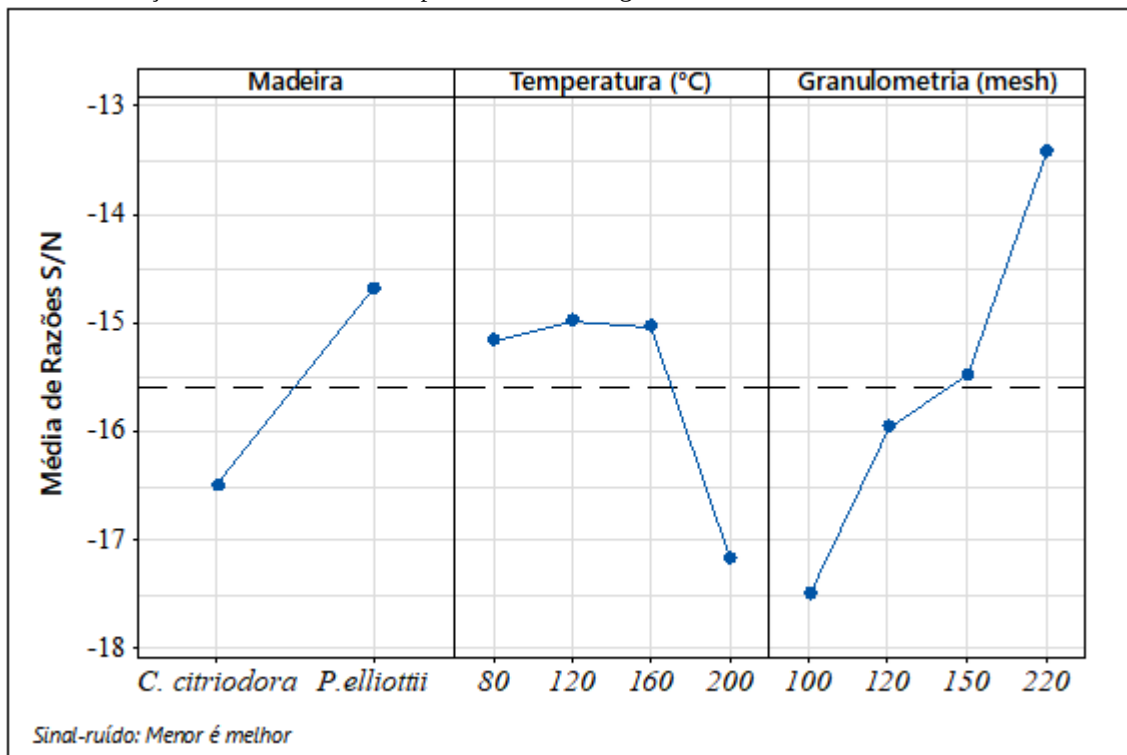


Figura 25 -Gráfico de efeitos principais com aplicação do sinal -ruído (S/N) menor melhor do comportamento da rugosidade $Ra(\mu m)$ em relação aos fatores granulometria da lixa e temperatura de termoretificação da matriz L_{16} , obtida pelo método de Taguchi .





Por meio da interpretação gráfica das Figuras 23, 24 e 25 têm-se as seguintes considerações:

- a) O gráfico de efeitos principais Figura 23, obtido pelo experimento fatorial completo L_{32} , apresentou as seguintes condições respectivamente para maior e menor rugosidade: (maior) *Corymbia citriodora* termorretificada a 200°C processada com a lixa de 100 *mesh*, e (menor) *Pinus elliottii* termorretificada a 120°C processada com a lixa de 220 *mesh*.
- b) A Figura 24 mostrou que a menor rugosidade foi obtida na temperatura de termorretificação de 160°C, porém ao ser aplicado o sinal-ruído, mostrou ser o valor médio da rugosidade constante, obtendo as seguintes condições respectivamente para maior e menor rugosidade da Figura 25: (maior) *Corymbia citriodora* termorretificada a 200°C processada com a lixa de 100 *mesh* e (menor) *Pinus elliottii* termorretificada a 80°C processada com a lixa de 220 *mesh*.

_____ Discussão dos Resultados: Gráfico de efeitos principais – abordagem comparativa entre os métodos experimental completo e Taguchi.

Ao comparar os resultados dos gráficos efeitos principais percebe-se que a condição dos fatores de lixamento que produz maior rugosidade superficial foi igual para ambos os métodos, porém para a menor rugosidade, se diferiram quanto à temperatura de termorretificação.

Além disso, pode-se observar que o gráfico de efeitos principais com sinal-ruído (S/N) apresentou a tendência da formação horizontal da reta para temperatura de termorretificação 80, 100 e 120°C demonstrando que estes níveis não proporcionam efeitos significativos da rugosidade, o que pode ser complementado pela informação fornecida pelo teste de *Tukey* da Tabela 16 o qual mostrou que estas temperaturas de termorretificação proporcionaram condições iguais do valor médio da rugosidade.



_____ Discussão dos Resultados: abordagem comparativa entre os métodos experimental completo e Taguchi.

O método Taguchi possui a facilidade de possuir menor condições de experimentos, sendo mais fácil a execução do experimento bem como a análise da matriz de dados para realizar teste de normalidade e heterogeneidade. No entanto, a diminuição das condições experimentais gerou valores do R^2 (ajustado) e R^2 (pred) fornecido pela ANOVA menores que os obtidos pelo uso do fatorial completo e houve a exclusão de relações significativas entre os fatores, quando realizado o teste de *Tukey*. Devido a isto, não projetou uma tendência do comportamento gráfico da rugosidade como a do experimento fatorial completo, eliminando assim, possíveis padrões em relação ao comportamento da rugosidade. No entanto, mesmo assim, o método de Taguchi mostrou ser uma interessante ferramenta para investigar melhor as escolhas das variáveis de análise, pois apresenta resultados próximos ao experimental completo, possibilitando adequar a escolha dos fatores experimentais. Por estas razões, as demais análises serão efetuadas baseando-se somente na matriz de dados obtida com a aplicação do experimento fatorial completo.

6.1.2. Abordagem utilizando o experimento fatorial completo para analisar o processo de lixamento das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* sem tratamento térmico

- **Contextualização:** Nesta etapa será analisado o comportamento da rugosidade em relação às madeiras não termorretificadas. Esses dados foram extraídos das Tabelas 7 e 8 formando, portanto, uma matriz L_8 , visto que são oito condições diferentes de lixamento com a madeira nesta condição.

A análise investigativa iniciou-se com a aplicação dos testes de normalidade e heterogeneidade da matriz de dados L_8 para efetuar a análise de variância (ANOVA). As pressuposições de normalidade e homogeneidade foram alcançadas, pois *p-valor* de *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente a 0,5475 e 0,6467, os quais foram obtidos com a retirada de *outliers*. Os resultados estão dispostos na Tabela 21.



Tabela 21-ANOVA das madeiras não termorretificada formada pela matriz L8 do experimento fatorial completo

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Madeira	1	6, 493	6, 4926	6,61	0, 012*
Granulometria	3	31, 741	10, 5805	10,77	0, 000***
Madeira*Granulometria	3	3, 654	1, 2179	1,24	0, 303
Erro	64	62, 871	0, 9824		
Total	71	104, 759			

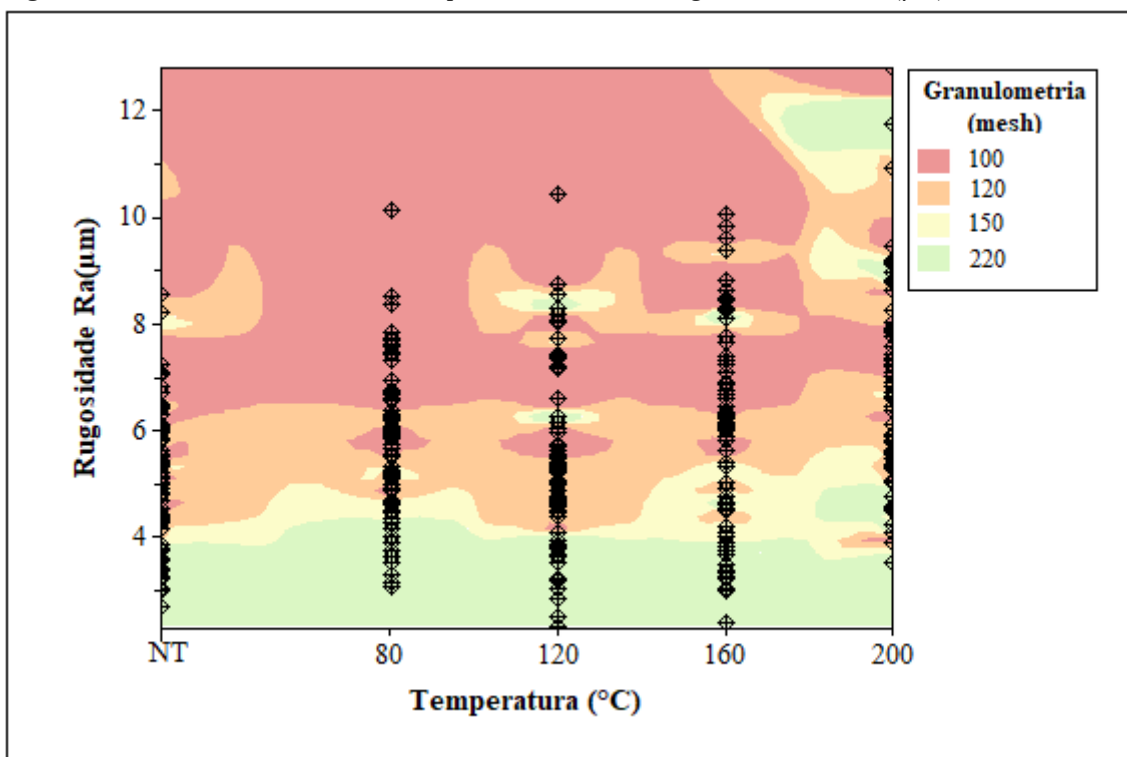
Sumário do Modelo: S= 0, 991141 $R^2 = 39,98\%$ $R^2(\text{aj}) = 33,42\%$ $R^2(\text{pred}) = 24,04\%$

Nível de significância: 0`\*\*\*`0,01`\*`

Segundo o resultado da Tabela 21 a relação entre os fatores granulometria da lixa e madeira, não são significativas no comportamento da rugosidade. Logo, em um processo industrial utilizando *Corymbia citriodora* e *Pinus elliotti* pode-se optar por uma das lixas de 100, 120, 150 e 220 mesh, porque o valor médio da rugosidade será igual.

Foi feito um gráfico de contorno (Figura 26) para observar a distribuição dos valores da rugosidade nas diferentes temperaturas de termorretificação incluindo as madeiras sem tratamento térmico, os dados foram obtidos da matriz completa L₄₀.

Figura 26 - Gráfico de contorno com dispersão dos dados da rugosidade média Ra(μm)





Por meio da Figura 26 é possível notar que a madeira sem tratamento térmico apresenta menor variabilidade e valor da rugosidade em relação as termorretificadas, cujo o aumento do gradiente de temperatura proporciona maior variabilidade das condições de contorno, como mostra a lixa de 150 *mesh*. Além disso, observa-se que madeiras termorretificadas facilitam o processo de remoção de material, sendo possível lixas de 220 *mesh* produzirem rugosidades elevadas, como as de 100 *mesh*.

No entanto pelos resultados da regressão múltipla das Tabelas 13 e 14, é provável que a variação do contorno presente nas madeiras termorretificadas é devido a questões pontuais anatômicas presentes na amostra, como nó, maior quantidade de lenho tardio ou até mesmo micro rachaduras provenientes dos processos anteriores de fabricação.

6.2. PARÂMETRO DE ANÁLISE: POTÊNCIA DE LIXAMENTO

6.2.1. Aplicação do experimento fatorial completo para analisar o comportamento da potência dissipada no processo de lixamento das madeiras termorretificadas *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.

▪ **Contextualização:** nesta etapa serão apresentados a matriz de dados completa dos valores da potência dissipada no processo de lixamento de todas as 40 condições estabelecidas pelo experimento fatorial completo, matriz L_{40} apresentada nas Tabelas 22 e 23. Neste tópico serão extraídos desta matriz (L_{40}) todas as condições de lixamento que envolvem as madeiras termorretificadas de *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*, totalizando uma matriz de dados com 32 condições (L_{32}).

Nas Tabelas 22 e 23 a seguir, são apresentados os valores das medidas descritivas da potência dissipada da matriz L_{40} , obtida pelo experimento fatorial completo.

**Tabela 22** - Valores descritivos da potência (W) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo L_{40} do lixamento do *Corymbia citriodora*.

Nº ensaios	Condições do ensaio do lixamento			Média	Desvio Padrão		
	Madeira	Temperatura	Lixa				
1	<i>C. citriodora</i>	NT	100 mesh	765,65	w	± 38,06	w
2	<i>C. citriodora</i>	NT	120 mesh	458,48	w	± 28,59	w
3	<i>C. citriodora</i>	NT	150 mesh	511,16	w	± 22,60	w
4	<i>C. citriodora</i>	NT	220 mesh	481,59	w	± 8,70	w
5	<i>C. citriodora</i>	80°C	100 mesh	900,40	w	± 8,51	w
6	<i>C. citriodora</i>	80°C	120 mesh	470,65	w	± 32,24	w
7	<i>C. citriodora</i>	80°C	150 mesh	421,64	w	± 10,83	w
8	<i>C. citriodora</i>	80°C	220 mesh	452,28	w	± 21,72	w
9	<i>C. citriodora</i>	120°C	100 mesh	866,87	w	± 16,70	w
10	<i>C. citriodora</i>	120°C	120 mesh	427,04	w	± 22,33	w
11	<i>C. citriodora</i>	120°C	150 mesh	425,97	w	± 27,69	w
12	<i>C. citriodora</i>	120°C	220 mesh	441,17	w	± 8,72	w
13	<i>C. citriodora</i>	160°C	100 mesh	855,11	w	± 17,57	w
14	<i>C. citriodora</i>	160°C	120 mesh	517,28	w	± 22,23	w
15	<i>C. citriodora</i>	160°C	150 mesh	425,96	w	± 31,22	w
16	<i>C. citriodora</i>	160°C	220 mesh	462,61	w	± 30,54	w
17	<i>C. citriodora</i>	200°C	100 mesh	827,00	w	± 69,23	w
18	<i>C. citriodora</i>	200°C	120 mesh	463,89	w	± 43,73	w
19	<i>C. citriodora</i>	200°C	150 mesh	485,08	w	± 5,44	w
20	<i>C. citriodora</i>	200°C	220 mesh	502,78	w	± 14,42	w

Fonte: próprio autor *NT= Não termorretificada

**Tabela 23-** Continuação dos valores descritivos da potência (W) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do *Pinus elliottii*.

Nº ensaios	Condições do Lixamento			Média	Desvio Padrão		
	Madeira	Temperatura	Lixa				
21	<i>P. elliottii</i>	NT	100 mesh	540,41	w	±10,49	w
22	<i>P. elliottii</i>	NT	120 mesh	550,30	w	±38,58	w
23	<i>P. elliottii</i>	NT	150 mesh	580,05	w	±16,74	w
24	<i>P. elliottii</i>	NT	220 mesh	557,43	w	±10,84	w
25	<i>P. elliottii</i>	80°C	100 mesh	891,73	w	±8,69	w
26	<i>P. elliottii</i>	80°C	120 mesh	544,68	w	±33,16	w
27	<i>P. elliottii</i>	80°C	150 mesh	482,08	w	±11,40	w
28	<i>P. elliottii</i>	80°C	220 mesh	530,45	w	±48,23	w
29	<i>P. elliottii</i>	120°C	100 mesh	566,42	w	±38,00	w
30	<i>P. elliottii</i>	120°C	120 mesh	492,05	w	±51,16	w
31	<i>P. elliottii</i>	120°C	150 mesh	505,52	w	±4,87	w
32	<i>P. elliottii</i>	120°C	220 mesh	498,40	w	±54,81	w
33	<i>P. elliottii</i>	160°C	100 mesh	453,51	w	±24,67	w
34	<i>P. elliottii</i>	160°C	120 mesh	549,86	w	±16,30	w
35	<i>P. elliottii</i>	160°C	150 mesh	507,70	w	±9,50	w
36	<i>P. elliottii</i>	160°C	220 mesh	513,01	w	±27,54	w
37	<i>P. elliottii</i>	200°C	100 mesh	522,77	w	±19,09	w
38	<i>P. elliottii</i>	200°C	120 mesh	505,92	w	±80,15	w
39	<i>P. elliottii</i>	200°C	150 mesh	535,39	w	±32,91	w
40	<i>P.elliotti</i>	200°C	220 mesh	451,39	w	±27,89	w

Fonte: próprio autor *NT= Não termorretificada

As Tabelas 22 e 23 foram formadas por meio de 6 medições da potência sendo possível observar a dispersão dos dados na Figura 27, complementado pelo gráfico de superfície 3D (Figura 28).



Figura 27- Gráfico de dispersão marginal realizada com os dados da matriz L_{40} relacionando rugosidade média $Ra(\mu m)$ e potência (W)

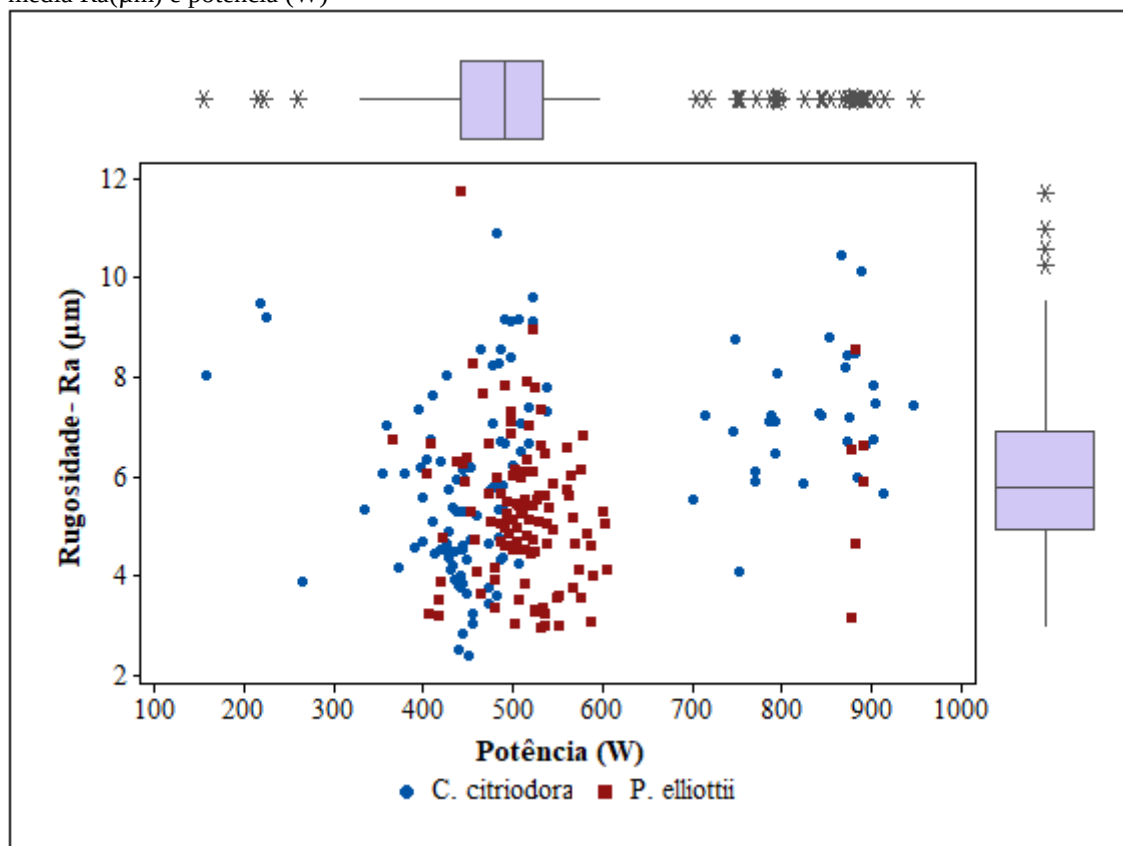
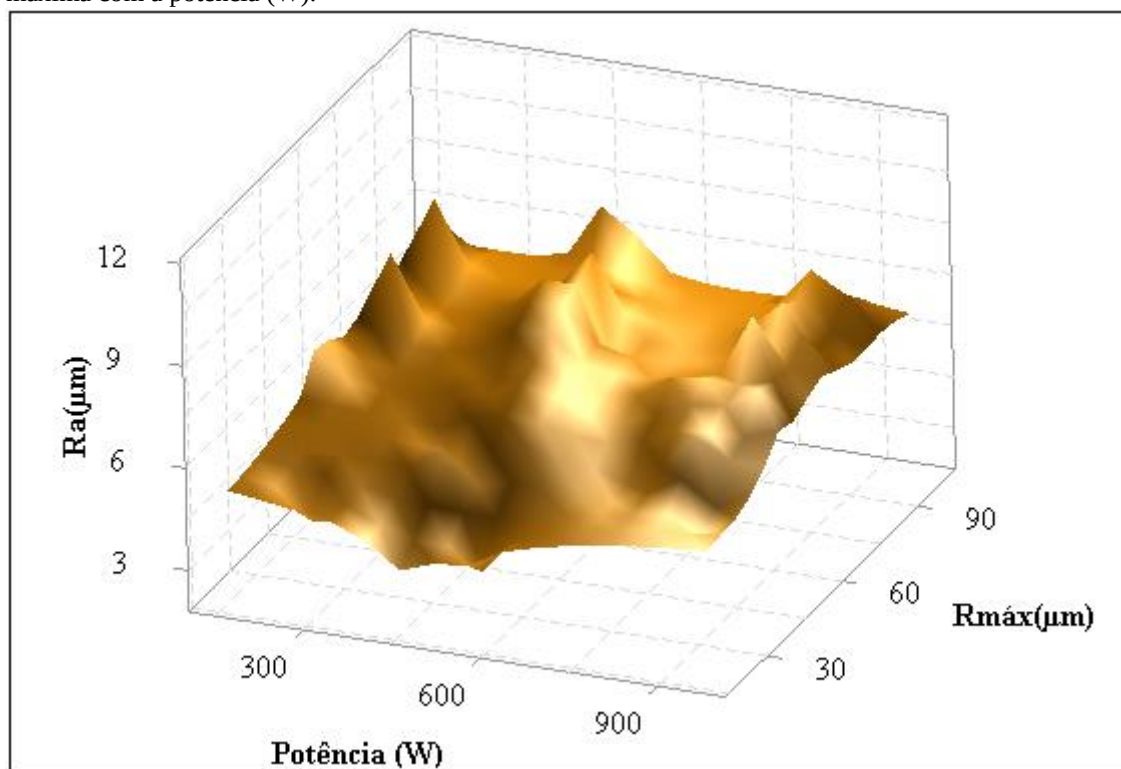


Figura 28 - Gráfico de superfície 3D da matriz de dados L_{40} relacionando as rugosidades média $Ra(\mu m)$ e máxima com a potência (W).





Por meio das Tabelas 22 e 23, percebe a tendência do *Corymbia citriodora* de gastar mais energia para ser processado, principalmente com as lixas de 100 mesh que proporcionaram a maior elevação da potência do sistema. O *Pinus elliotti* não mostrou comportamento tendencioso e seus valores foram mais próximos, aparentando estar visualmente concentrados mais que o *Corymbia citriodora* como mostrou a Figura 27.

A Figura 28 mostrou uma superfície irregular devido a frequência de picos e vales, não sendo possível diagnosticar uma relação padrão entre rugosidade e potência, indicando uma correlação de baixa intensidade entre estes fatores, porque é possível visualizar que valores de rugosidades menores e maiores geraram a mesma potência.

Uma hipótese para estes resultados iniciais é a questão anatômica da madeira, uma indicação disto, é dispersão dos dados da potência mostrando grande variabilidade e diferença entre as espécies do *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.

Afim de investigar se esta hipótese é válida, assim como o comportamento da potência e averiguar se os resultados iniciais apresentados são válidos, realizou os testes de normalidade e homogeneidade para fazer a análise de variância (ANOVA) e iniciar a análise investigativa dos dados.

A matriz de dados L_{32} alcançou às pressuposições de normalidade e homogeneidade, pois *p*-valor do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente 0,1117 e 0,09658, sendo necessário para alcançá-las a retirada de *outliers* e transformação logarítmica dos dados, o resultado encontra-se na Tabela 24.

Tabela 24 - ANOVA com a matriz L_{32} , experimento fatorial completo com as madeiras termorretificadas para análise da potência

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
mesh	3	0,1056	0,0352	7,701	9,08e-05 ***
Temperatura	3	0,0249	0,0083	1,817	0,147452
Madeira	1	0,3753	0,3753	82,087	1,99e-15 ***
mesh*Temperatura	8	0,3973	0,0497	10,863	1,41e-11 ***
mesh*Madeira	2	0,0347	0,0173	3,790	0,025181 *
Temperatura*Madeira	3	0,0830	0,0277	6,054	0,000693 ***
mesh*Temperatura*Madeira	6	0,0612	0,0102	2,232	0,044132 *
Erro	127	0,5806	0,0046		
Total	153	1,66270			

Sumário do Modelo: S= 0,0847917 $R^2 = 38,17\%$ $R^2(aj) = 33,84\%$ $R^2(pred) = 28,45\%$

*** Nível de significância: 0`\*\*\*` 0,001`\*\*` 0,05`\*`

Fonte: elaborada pelo autor



O resultado da Tabela 24 mostrou que o único fator não significativo é a temperatura de termorretificação, enquanto os demais e todas as interações entre os fatores são. Quanto ao coeficiente de determinação R^2 do modelo, apresentou valor baixo, sendo isto justificado pelo resultado da matriz de correlação da Tabela 25.

Tabela 25 - Coeficientes dos fatores formados pelo matiz de correlação da matriz L_{32} referentes a potência de lixamento

Fatores	Madeira	Temperatura	Granulometria	Rugosidade
Coeficientes	0,48	0,10	-0,19	0,06

O resultado da Tabela 25 confirma baixa dependência estatística entre os fatores temperatura de termorretificação e granulometria da lixa pois possuem uma relação fraca com a potência, contribuindo para o baixo valor do R^2 . Além disso, a correlação confirmou o indício apresentado pelo gráfico de superfície da Figura 28, de que a relação entre os fatores rugosidade e potência é bem fraca. Enquanto, a espécie de madeira obteve uma correlação moderada em relação a potência.

Para quantificar o impacto percentual que estes fatores em conjunto afetam no comportamento da potência fez a regressão múltipla para obter o R^2 ajustado. O resumo do modelo com os coeficientes é fornecido na Tabela 26.

Tabela 26 - Coeficientes estimados e resumo do modelo de regressão para potência de lixamento

Variáveis	Coeficientes estimados	Erro padrão	Valor de t	Nível de significância
Intercepto	6,049089	0,038457	157,294	<2e-16***
Granulometria	-0,011432	0,007491	-1,526	0,129
Temperatura	0,006241	0,006714	0,930	0,354
Madeira	0,096069	0,015034	6,390	1,98e-09 ***
R^2 múltiplo	0,2488			
R^2 Ajustado	0,2337			
Erro padrão do resíduo	0,09125	G.L 276		
Estatística F	16,56	p valor = 2,411e-09		

*** significativo a 0%

Por intermédio da Tabela 26 foi possível verificar que o único fator significativo na variabilidade dos dados da potência dissipada foi a madeira, a qual explica 23,37% do seu comportamento. Tal resultado, complementado pela matriz de correlação,



confirmou a hipótese inicial que as características anatômicas da madeira foram as responsáveis pela dispersão e os *outliers* mostrados na Figura 27.

Logo, em um processo industrial em que há o uso de duas espécies de madeira ou mais, a tendência é que esta variabilidade de matéria-prima afete com significância na potência de lixamento.

Sabido disto, fez a análise de variância das madeiras separadamente para saber como estas se comportam em relação aos fatores e níveis estipulados. Iniciou com os testes de normalidade e homogeneidade para o *Corymbia citriodora*, obtendo *p*-valor do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* respectivamente 0,08677 e 0,119. Porém, estes valores só foram alcançados, após a retirada dos dados referentes a lixa de 100 *mesh*, isto mesmo realizando a transformação *Box-Cox*. O resultado está na Tabela 27.

Tabela 27 - Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (*Ra*) do experimento fatorial completo do processo de lixamento do *Corymbia citriodora* para lixas de 120,150 e 220 *mesh*

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Temperatura	3	25370	8456,7	14,08	0,000***
Granulometria	2	5798	2899,1	5,43	0,007***
Temperatura *Granulometria	6	15491	2581,8	4,83	0,001***
Erro	55	29382	534,2		
Total	66	76698			

Sumário do Modelo: S= 23,11 $R^2 = 61,69\%$ $R^2(\text{aj}) = 54,03$ $R^2(\text{pred}) = 42,11\%$

Nível de significância: 0`\*\*\*` 0,001`\*\*` 0,01`\*`

Temperatura (madeira termorretificada)

O resultado da ANOVA do *Pinus elliottii* está na Tabela 28 e os dados alcançaram as pressuposições de normalidade e heterogeneidade, pois *p*-valor do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente de 0,4952 e 0,1549, e para alcançá-las foi necessário a retirada de *outliers*.

Tabela 28 - Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade (*Ra*) do experimento fatorial completo do processo de lixamento do *P.elliotti*

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Temperatura	3	6155	2052	0,99	0,403
Granulometria	3	3429	1143	0,55	0,650
Temperatura *Granulometria	8	85266	10658	9,16	0,000***
Erro	75	87249	1163		
Total	89	182226			

Sumário do Modelo: S= 45,59 $R^2 = 5,33$ $R^2(\text{aj}) = 0,00\%$ $R^2(\text{pred}) = 0,00\%$

Nível de significância: 0`\*\*\*`

Temperatura (madeira termorretificada)



Analisando o resultado da Tabela 27 têm-se que os fatores temperatura de termorretificação e granulometria são significativos no comportamento da potência dissipada do *Corymbia citriodora*, assim como a relação entre eles. Sendo que a lixa de 100 *mesh*, dissipa maior potência no sistema apresentando valores discrepantes em relação as lixas de 120, 150 e 220 *mesh*, interferindo por isso consideravelmente no comportamento da matriz de dados, necessitando fazer então uma análise a parte.

Portanto, analisou uma matriz L_4 , visto que foram quatro condições com a lixa de 100 *mesh*, nas temperaturas de 80, 120, 160 e 200°C. A matriz alcançou normalidade e homogeneidade dos dados, pois *p-valor* do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente 0,107 e 0,1785 e em seguida fez o teste de *Tukey*, o qual mostrou que a única condição que se difere é a madeira termorretificada a 80°C, produzindo dissipação da potência maior do que as demais.

Esta discrepância da potência dissipada pela lixa de 100 *mesh*, revela a tendência da potência aumentar no processamento da madeira com lixas de granulometrias menores que esta, enquanto as consideradas mais finas neste experimento, as de 120, 150 e 220 *mesh* mostraram menor variabilidade entre elas, apresentando por isso, valores próximos da potência como visto na Tabela 22. Resultado este, consequente da baixa correlação entre os fatores como pode ser notado na Tabela 29.

Tabela 29- Coeficientes da matriz de correlação para o *C.citriodora* para as lixas de 120,150 e 220 *mesh*

Fatores	Temperatura	Granulometria	Rugosidade
Coeficientes	0,21	-0,005	0,322

Por meio da matriz de correlação da Tabela 29 percebe-se que as lixas consideradas mais finas, 120, 150 e 220 *mesh* apresentam influencia muito baixa estatisticamente, praticamente nula, em relação a potência dissipada, assim como os demais fatores.

A matriz de correlação do *Pinus elliotti* também foi feita, e o resultado pode ser visto na Tabela 30 a seguir.

Tabela 30- Coeficientes da matriz de correlação para o *P.elliotti*

Fatores	Temperatura	Granulometria	Rugosidade
Coeficientes	-0,02	-0,07	-0,09



Por meio do resultado da matriz de correlação da Tabela 30 é possível constatar que a influência dos fatores é muito baixa em relação a potência, apresentando coeficientes menores do que os apresentando no processamento do *Corymbia citriodora*.

Obtidas essas informações foi feito os gráficos de interação, complementados com o teste de *Tukey*, devido aos resultados obtidos nas Tabelas 27 e 28.

▪ Análise da relação dos fatores: granulometria da lixa x madeira

A Figura 29 mostra o gráfico de interação entre os fatores granulometria da lixa e espécie de madeira com o resultado do teste de *Tukey* das Tabelas 31 e 32.

Figura 29 - Gráfico de interação entre os fatores temperatura de termorretificação e espécies de madeira em relação ao comportamento da potência (W)

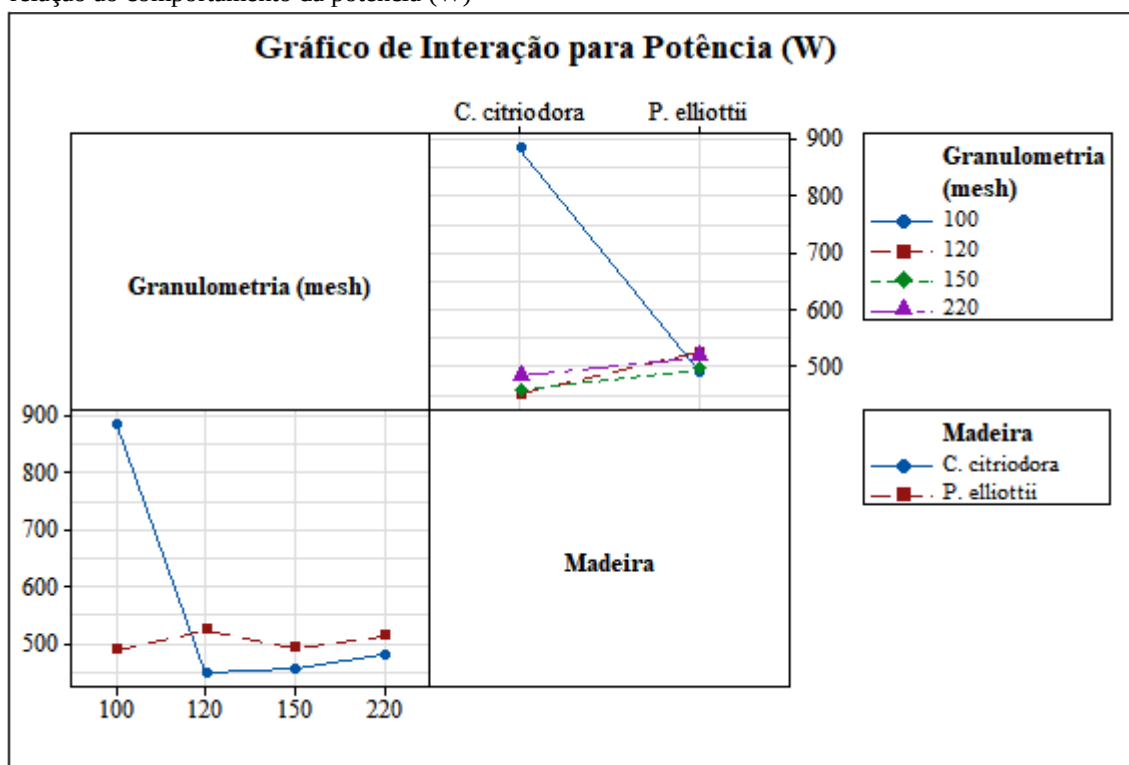


Tabela 31- Informações de Agrupamento Usando Método de *Tukey* para o *C.citriodora*

Granulometria da lixa	N	Média	Agrupamento
100 mesh	25	841,090	A
120 mesh	20	470,260	B
220 mesh	24	464,982	B
150 mesh	23	448,144	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.



Tabela 32- Informações de Agrupamento Usando Método de *Tukey* para o *P.elliotti*

Granulometria da lixa	N	Média	Agrupamento
120 mesh	24	512,101	A
100 mesh	18	502,561	A
150 mesh	24	500,327	A
220 mesh	24	495,711	A

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Por meio da interpretação gráfica da Figura 29 complementada pelas informações das Tabelas 31 e 32, têm-se as seguintes considerações:

- O *Corymbia citriodora* proporcionou maior potência dissipada quando processado com a lixa de 100 mesh, tendendo a uma constância do valor em relação as demais lixas. Porém, segundo a Tabela 31 o processamento da madeira com a lixas de 120 e 220 mesh são estatisticamente iguais, diferenciando-se da lixa de 150 mesh que apresentou a menor dissipação da potência em relação as demais.
- O *Pinus elliotti* tendeu a uma constância da potência, resultado confirmado pela Tabela 32, que não mostrou diferença entre as médias da potência.
- As lixas finas de 120, 150 e 220 mesh dissipam maior energia no processamento do *Pinus elliotti* do que com o *Corymbia citriodora*, cujo valor da potência só é maior, com a lixa de 100 mesh, acentuando-se significativamente em relação as demais.

▪ **Análise da relação dos fatores: temperatura de termorretificação x madeira**

A Figura 30 mostra o gráfico de interação entre os fatores temperatura de termorretificação complementado com o resultado do teste de *Tukey* das Tabelas 33 e 34.



Figura 30 - Gráfico de interação entre os fatores temperatura de termorretificação e espécies de madeira em relação ao comportamento da potência (W)

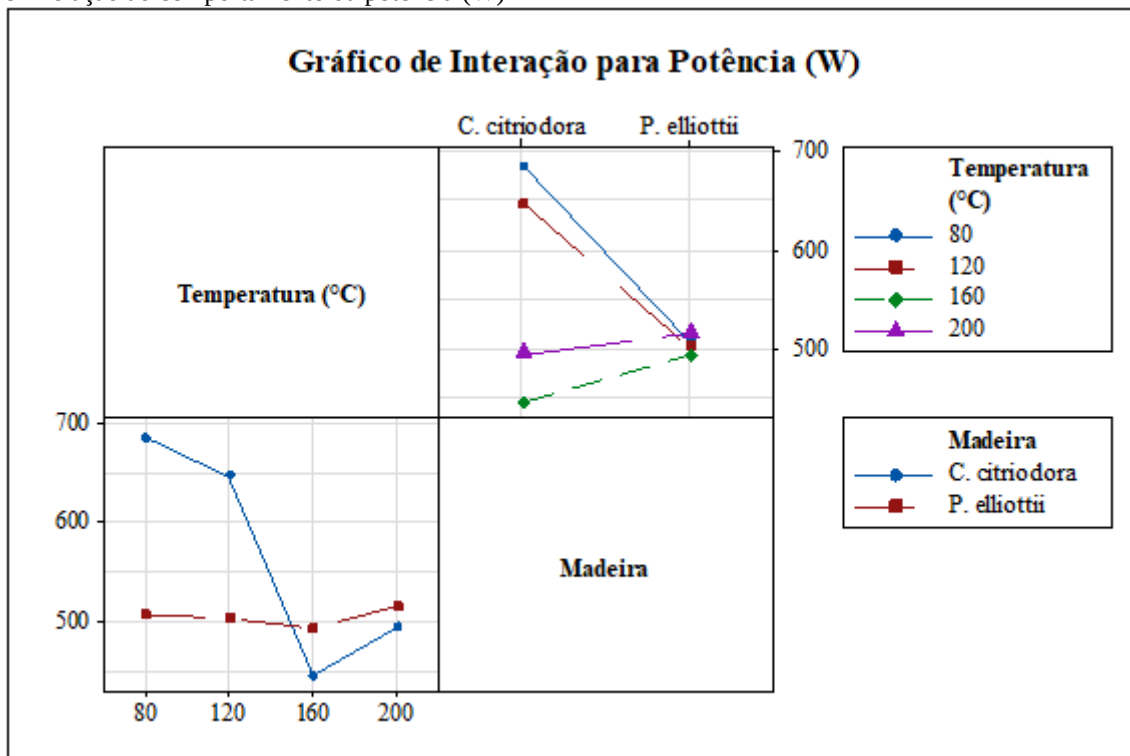


Tabela 33- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey para o *C.citriodora*

Temperatura de termorretificação	N	Média	Agrupamento
200°C	16	486,367	A
160°C	16	472,938	A
80°C	17	448,483	B
120°C	18	436,727	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Tabela 34- Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey para o *P.elliottii*

Temperatura de termorretificação	N	Média	Agrupamento
80°C	18	511,166	A
120°C	24	510,723	A
160°C	24	496,258	A
200°C	24	492,554	A

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Por meio da interpretação gráfica da Figura 30 complementada pelas informações das Tabelas 33 e 34, constata-se que mesmo com a variabilidade gráfica apresentada pelo *Corymbia citriodora* nota-se pela Tabela 33 que o valor da potência foi igual no

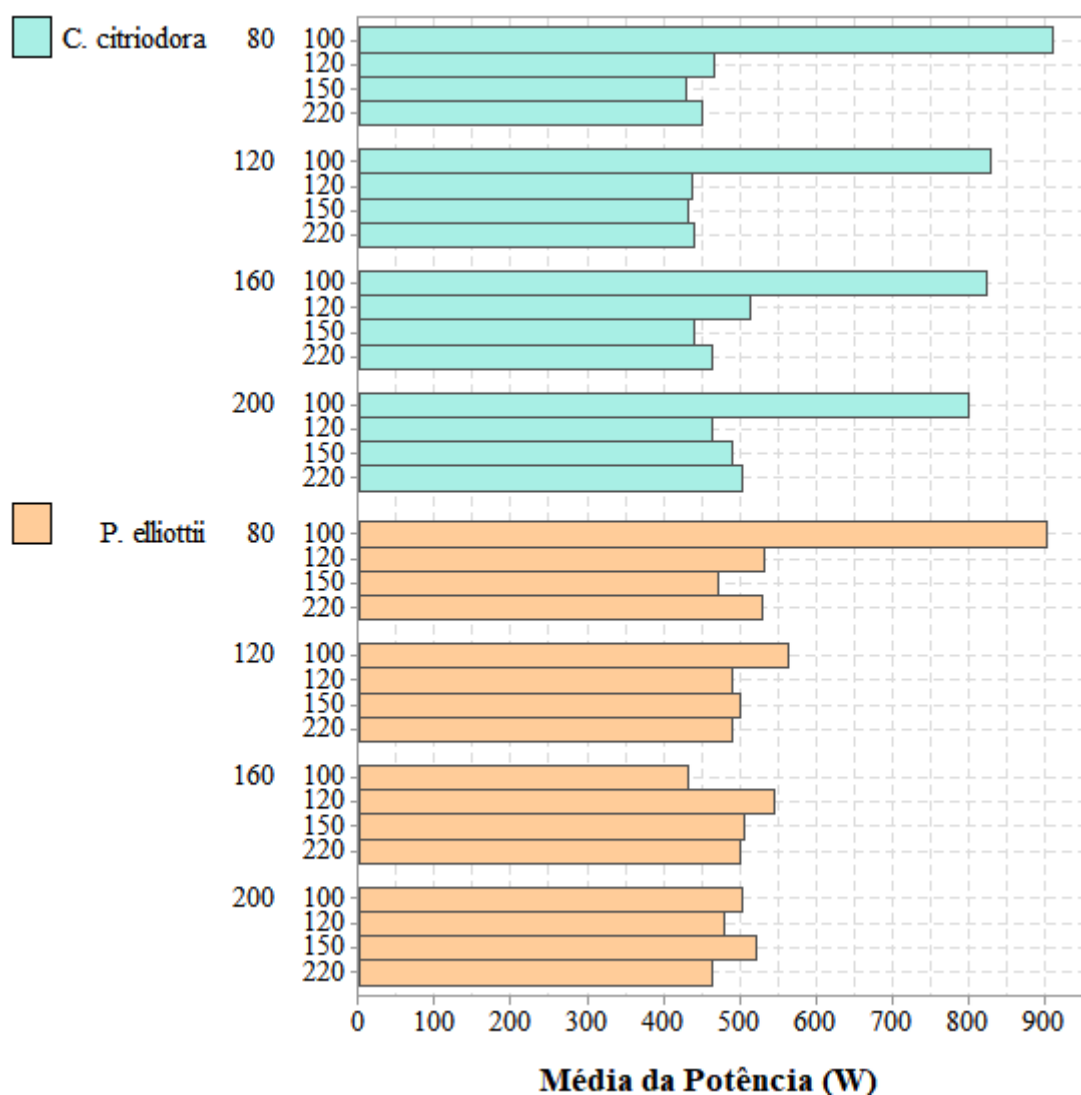


processamento da madeira termorretificada a 80 e 120°C, e também a 160 e 200°C. E que o *Pinus elliotti* tende a manter a potência independente da temperatura de termorretificação da madeira, como confirmado pelo resultado da Tabela 34.

▪ **Análise da relação dos fatores: granulometria da lixa x temperatura de termorretificação**

A Figura 31 mostra o gráfico de barras relacionando os fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação.

Figura 31 - Gráfico de barras relacionando os fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação da madeira no comportamento da potência (W).





O propósito da Figura 31 foi observar um quadro geral do comportamento da potência de ambas as madeiras investigadas, sendo possível graficamente compará-las. Seguido dos resultados do teste de *Tukey* das Tabelas 35, 36 e 37 para saber quais condições propostas de lixamento se diferenciam no valor da potência. Por fim, foi feito gráfico de efeitos principais da Figura 32 que resume as informações obtidas neste tópico.

Tabela 35 - Informações de Agrupamento de *Tukey* do *Corymbia citriodora* 120 ,150, 220 mesh

Temperatura*Granulometria	N	Média	Agrupamento		
160°C* 120 mesh	4	514,237	A		
200°C* 220 mesh	6	504,066	A		
200°C* 150 mesh	6	491,147	A	B	
80°C* 120 mesh	6	466,035	A	B	C
160°C* 220 mesh	6	464,412	A	B	C
200°C* 120 mesh	4	463,889	A	B	C
80°C* 220 mesh	6	450,231		B	C
120°C* 220 mesh	6	441,221			C
160°C* 150 mesh	6	440,164			C
120°C* 120 mesh	6	436,879			C
120°C* 150 mesh	6	432,081			C
80°C* 150 mesh	5	429,185			C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Tabela 36- *Corymbia citriodora* termorreteificado com a lixa de 100 mesh

Temperatura*Granulometria	N	Média	Agrupamento		
80°C 100 mesh	6	910,178	A		
120°C 100 mesh	6	828,208			B
160°C 100 mesh	6	824,489			B
200°C 100 mesh	6	801,484			B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

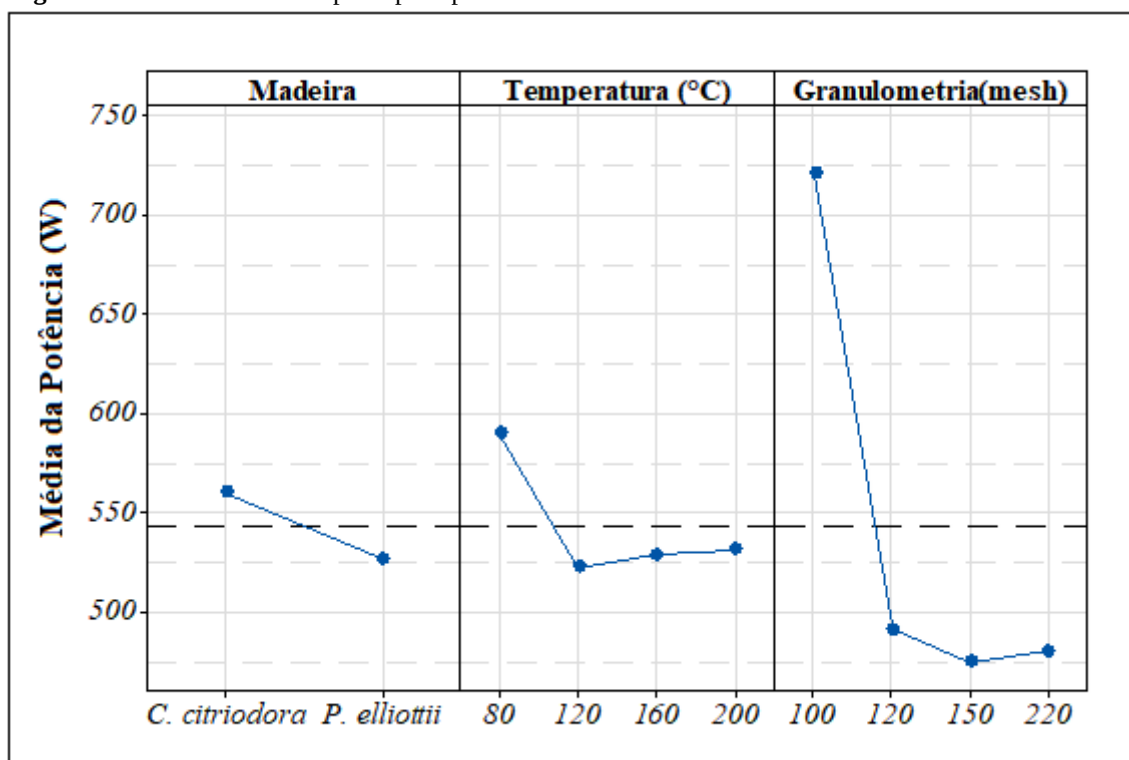


Tabela 37 - Informações de Agrupamento de Tukey do *Pinus elliotti* 100, 120, 150 e 220 mesh

Temperatura*Granulometria	N	Média	Agrupamento			
80°C* 100 mesh	6	903,718	A			
120°C* 100 mesh	6	563,216	B			
160°C* 120 mesh	6	546,506	B	C		
80°C* 120 mesh	6	531,548	B	C	D	
80°C* 220 mesh	6	528,901	B	C	D	E
200°C* 150 mesh	6	521,378	B	C	D	E
160°C* 150 mesh	6	505,556	B	C	D	E
200°C* 100 mesh	6	504,689	B	C	D	E
160°C* 220 mesh	6	501,683	B	C	D	E
120°C* 150 mesh	6	501,211	B	C	D	E
120°C* 120 mesh	6	489,341		C	D	E F
120°C* 220 mesh	6	489,123		C	D	E F
200°C* 120 mesh	6	481,008		C	D	E F
80°C* 150 mesh	6	473,162			D	E F
200°C* 220 mesh	6	463,139				E F
160°C* 100 mesh	6	431,288				F

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes

Figura 32- Gráfico de efeitos principais para o *C.citriodora* e *P.elliotti*





Observando a Figura 32 reafirma as constatações anteriores que a lixa de 100 *mesh* proporcionou a maior dissipação da potência no processamento do *Corymbia citriodora* termorretificado destoando-se das demais lixas de 120, 150 e 220 *mesh*, consideradas mais finas. Devido a isto, foi feito a análise a parte do teste de *Tukey* para a lixa de 100 *mesh*, constatando por meio da Tabela 36 que a madeira termorretificada a 80°C é a única condição que se difere produzindo maior valor da potência, enquanto as demais temperaturas, não se diferem estatisticamente em relação à média da rugosidade.

Ainda em relação ao *Corymbia citriodora* foi possível visualizar graficamente na Figura 32 que a potência dissipada tendeu a constância independente da temperatura e da granulometria das lixas de 120, 150 e 220 *mesh*, sendo isto, verificado com o resultado de *Tukey* da Tabela 35, onde poucas condições se diferiram. Além disso, pode-se averiguar que : (a) a lixa de 100 *mesh* dissipa maior potência quando processa madeira termorretificadas a 80°C e menor e igual nas temperaturas de 120,160 e 200°C; (b) a lixa de 120 *mesh* dissipa potência igual quando processa madeira termorretificada nas temperaturas de 80,160 e 200°C e produzindo menor valor a 120°C; (c) a lixa de 150 *mesh* dissipa maior energia no lixamento da madeira termorretificada a 200°C enquanto as demais dissipam a mesma quantidade de energia; (d) e a lixa de 220 *mesh* dissipa maior energia com a madeira termorretificada a 200°C e nas outras temperaturas dissipa de igual forma.

Quanto ao *Pinus elliotti* a Figura 32 mostrou uma discrepância significativa na condição da lixa de 100 *mesh* com a madeira termorretificada a 80°C devido ao maior valor apresentado da potência comparado as demais condições. Isto explica o fato do teste de normalidade considerar tais dados como *outliers*, os quais interfeririam na normalidade da matriz de dados.

Este resultado ocorreu provavelmente devido as questões anatômicas pontuais encontradas na superfície da madeira como nó ou maior concentração de canais resiníferos, aliado a ação da lixa de maior granulometria, visto que , a lixa de 100 *mesh* foi a única que diferenciou o valor da potência em relação a temperatura, enquanto as demais não, ou seja, as lixas mais finas independente da granulometria ser de 120, 150 ou 220 *mesh*, dissiparam energia igual no sistema enquanto a de 100 *mesh* além de dissipar maior energia, produz potências diferentes com a mudança da temperatura de termorretificação da madeira a 80°C , 120 e 200°C e a 160°C.



Também pode-se verificar que ambas as madeiras apresentarem maiores valores e variabilidade dos dados da potência dissipada com a lixa de 100 *mesh* com a madeira termorretificada a 80°C, como pode-se observar na Figura 31 e 32, sendo nesta notado que tal condição de processamento, proporcionou maior inclinação da reta indicando maior magnitude do efeito principal, como confirmado com as análises anterior.

Este resultado, portanto, indica a tendência da lixadeira apresentar maior variação e dissipação da potência com a utilização de lixas mais grossas. Enquanto as consideradas finas de 120, 150 e 220 *mesh* tendem a constância, como diagnosticou o teste de *Tukey*, cujo resultado mostrou pouca distinção entre as condições, sendo estas decorrentes das questões anatômicas pontuais presentes na madeira e não pelo tamanho do grão, como pode ser examinado pelo resultado da regressão múltipla da Tabela 26

Discussão dos Resultados dos Gráfico de interação e Teste de *Tukey*

Foi possível notar que ambas as madeiras apresentaram maiores valores e variabilidade dos dados da potência dissipada com a lixa de 100 *mesh*, enquanto as consideradas finas, 120, 150 e 220 *mesh* tendem a ser constantes produzindo valores menores no lixamento do *Pinus elliotti* e obtendo poucas variações no processamento do *Corymbia citriodora*.

Por meio deste resultado pode-se compreender melhor o gráfico de superfície da Figura 28 em que as lixas finas são a parte constante, aparentando lisura e os picos são formados pela lixa de 100 *mesh* principalmente no lixamento do *Corymbia citriodora*. Isto ressalta juntamente com a análise investigativa realizada anteriormente que os fatores com maior interferência no comportamento da potência são lixas com granulometrias ≥ 100 *mesh*; e a presença de questões anatômicas pontuais como no caso do *Pinus elliotti* termorretificado a 80°C, em que provavelmente havia a presença de nós ou maior quantidade de lenho tardio, assim como as condições que se diferenciaram do *Corymbia citriodora*, acarretadas possivelmente devido a micro trincas, maior quantidade de extrativo e cerne.

Supõem-se que além das questões anatômicas mencionadas a densidade da madeira também pode ter interferido no resultado, pois a densidade básica e aparente do *Pinus elliottii* obtidos foram respectivamente 355,9 e 463,83 kg.m³ e, portanto, menor



que o *Corymbia citriodora*, 731,7 e 959,1 kg.m³. Por conta da menor densidade o grão abrasivo penetrou com mais facilidade no *Pinus elliottii* que aliado a porosidade contribuiu para amortecer a ação do grão, absorvendo maior energia do que dissipando, outra característica desta madeira é a presença de resina que dificulta a ação de corte e acarreta no empastamento da lixa rapidamente principalmente nas granulometrias finas. Por isso, a maior dissipação e variação da potência com a lixa de 100 mesh, porque devido ao seu maior tamanho em relação as demais conseguiu atuar com maior durabilidade, apresentando mais facilidade em realizar a ação de corte.

Em relação ao *Corymbia citriodora* a maior densidade contribuiu para ação do atrito, o fazendo desgastar rapidamente, principalmente as lixas mais finas. Sendo isto, possivelmente uma das causas da lixa de 100 mesh ter apresentado maior potência, pois por ter grãos maiores comparada as demais, conseguiu permanecer com maior poder de corte ao longo do processo de lixamento, dissipando por isso maior potência.

Por meio da investigação estatística constatou que as questões anatômicas assim como os demais fatores estipulados na análise, apresentaram baixa correlação e porcentagem de influência. Portanto, há outras variáveis que influenciam no comportamento da potência dissipada podendo estas serem os parâmetros do maquinário, por exemplo, pressão, força, velocidade de lixamento dentre outros.

6.2.2. Abordagem experimento fatorial completo para analisar a potência dissipada no processo de lixamento das madeiras *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*

- **Contextualização:** Nesta etapa será analisado o comportamento da potência em relação às madeiras sem termorretificação. A matriz de dados analisada nesta etapa foi extraída das Tabelas 22 e 23, formando uma matriz L₈, visto que são oito condições diferentes de lixamento com a madeira nesta condição.

Para realizar a análise de variância (ANOVA) alcançou às pressuposições de normalidade e homogeneidade dos dados da matriz L₈, pois *p-valor* do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente 0,5478 e 0,1261. Estes valores foram alcançados, após transformação Box-Cox e retirada de *outliers*. O resultado encontra-se na Tabela 38

**Tabela 38** - ANOVA das madeiras não termorretrificada formada pela matriz L_8 do experimento fatorial completo em relação ao parâmetro potência

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Madeira	1	0,14681	0,14681	55,67	0,000***
Granulometria	3	0,03339	0,01113	4,22	0,0119*
Madeira*Granulometria	2	0,08412	0,04206	15,96	0,000***
Erro	35	0,09225	0,00264		
Total	41	0,356574			

Sumário do Modelo: $S = 0,069421$ $R^2 = 50,54\%$ $R^2(\text{aj}) = 45,19\%$ $R^2(\text{pred}) = 37,26\%$

Nível de significância: 0`\*\*\*`0,01`\*`

Segundo o resultado da Tabela 38 existe relação significativa entre os fatores madeira e granulometria da lixa no comportamento da potência. Por isso, foi feito o gráfico de interação Figura 33 juntamente com o teste de *Tukey* para complementá-lo, cujo resultado encontra-se na Tabela 39.

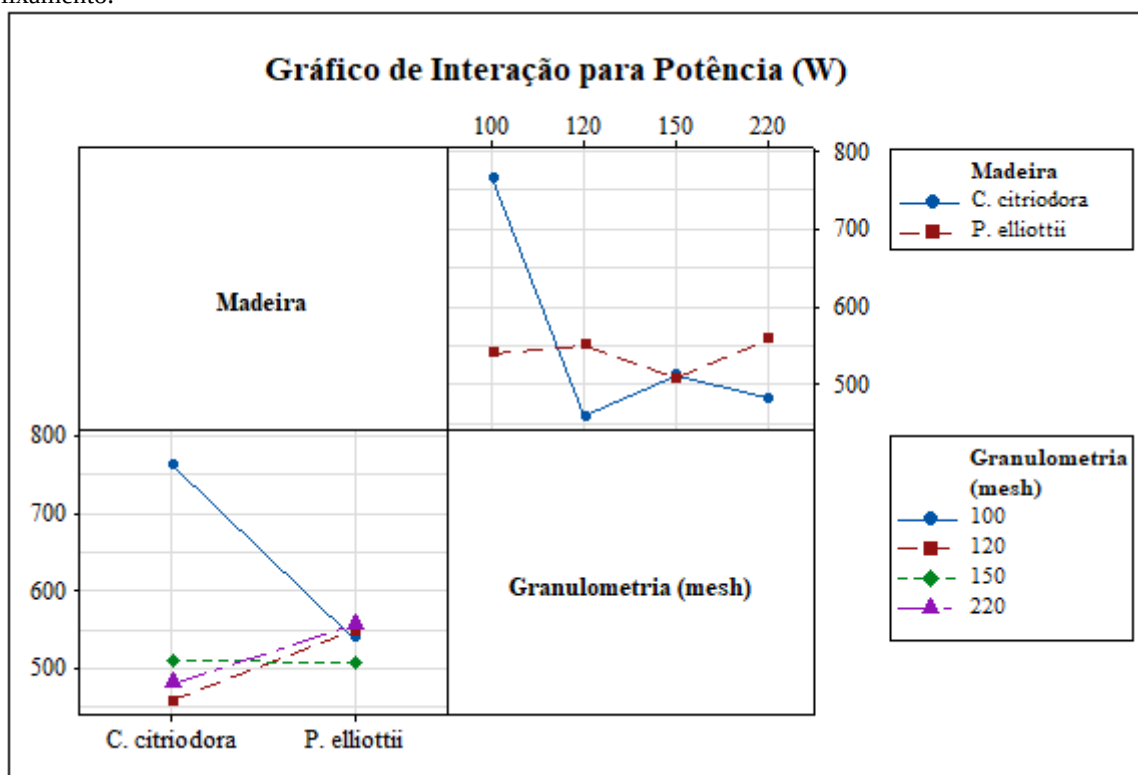
Figura 33 - Gráfico de interação entre os fatores granulometria e madeira não termorretrificadas *C.citriodora* e *P. elliotti* em relação ao comportamento da potência (W) dissipada no processo de lixamento.

**Tabela 39** - Informações de Agrupamento Usando Método de *Tukey* e Confiança de 95% em relação aos fatores madeira e granulometria

Madeira*Granulometria	N	Média	Agrupamento		
<i>Corymbia citriodora</i> 100 mesh	3	641,000	A		
<i>Pinus elliottii</i> 220 mesh	4	546,167	B		
<i>Pinus elliottii</i> 100 mesh	4	545,632	B		
<i>Pinus elliottii</i> 120 mesh	4	538,750	B	C	
<i>Pinus elliottii</i> 150 mesh	4	513,625	B	C	D
<i>Corymbia citriodora</i> 150 mesh	5	494,790		C	D
<i>Corymbia citriodora</i> 220 mesh	6	479,755			D
<i>Corymbia citriodora</i> 120 mesh	4	461,595			D

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Por meio da interpretação da Figura 33 complementada pelas informações da Tabela 39, têm-se as seguintes considerações:

- O *Pinus elliotti* tende a apresentar potência constante, sendo confirmado pelo teste de *Tukey* que não há diferença estatística em relação às lixas, portanto independente da granulometria da lixa a potência dissipada é a mesma.
- O *Corymbia citriodora* apresentou uma maior variação no comportamento da potência, distinguindo-se, no entanto, conforme o teste de *Tukey* somente a lixa de 100 mesh em relação às demais.

Discussão dos Resultados: comparativo entre as madeiras termorretificadas em relação ao comportamento da potência.

O resultado da análise de variância da Tabela 38 apresentou melhor capacidade preditiva dos resultados, do que a Tabela 24, com as madeiras termorretificadas, consequência do aumento do valor do coeficiente de correlação da madeira como mostra o resultado da matriz de correlação da Tabela 40.

Tabela 40- Coeficiente de correlação da matriz de dados L_{16} para não termorretificada.

Fatores	Madeira	Granulometria	Rugosidade
Coeficientes	0,69	-0,07	-0,18



As Tabelas 25 e 40 confirmam que o fator madeira age com maior interferência na variabilidade da potência dissipada, independentemente de estar termorretificada ou não, apresentando correlação moderada, enquanto os demais fatores, granulometria e rugosidade, correlação baixa. Nota-se que a madeira sem tratamento apresenta maior coeficiente de correlação, indicando maior intensidade na relação com comportamento da potência, assim como a relação com a rugosidade que foi mais elevado e inverso.

Quanto ao resultado da Tabela 39 observa-se que poucas foram as condições que se distinguiram em relação ao valor da média da potência, assim como os resultados com a madeira na condição termorretificada. Além disso, mostra que o *Pinus elliotti* independentemente de estar termorretificado ou não, mantém o valor da potência dissipada no processo de lixamento independente da granulometria da lixa, enquanto o *Corymbia citriodora*, distingue-se somente na lixa de 100 mesh.

Esta distinção da média da potência produzida pela lixa de 100 mesh foi vista também quando a madeira estava termorretificada, corroborando com as análises anteriores que a lixa de 100 mesh devido a sua maior granulometria em relação as demais, penetra mais profundamente o grão necessitando de maior força de usinagem para realizar o lixamento, dissipando por isso, maior potência. No entanto, deve-se levar em consideração que houve uma parcela significativa desta variação em decorrência das características anatômicas pontuais da madeira como micro trincas, nó, maior parte do cerne e lenho tardio, dificultado a ação do grão e por isso, dissipando maior energia, visto que a madeira apresentou correlação moderada e a granulometria da lixa baixa.

6.3. PARÂMETRO DE ANÁLISE: VIBRAÇÃO

6.3.1. Abordagem experimento fatorial completo para analisar o comportamento da vibração das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* com e sem tratamento térmico

- **Contextualização:** nesta etapa apresenta-se a matriz de dados completa dos valores da vibração obtida no processo de lixamento com as 40 condições estabelecidas pelo experimento fatorial completo, formando a matriz L_{40} disposta nas Tabelas 41 e 42. Foram extraídos desta matriz somente as condições que envolvem as madeiras termorretificadas, totalizando em 32 condições, formando a matriz L_{32} .



Nas Tabelas 41 e 42 são apresentados os valores das medidas descritivas das seis medições obtidas da vibração do sistema.

Tabela 41-Valores descritivos da vibração (m/s^2) em relação a todas às condições de ensaio obtidos como experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do *Corymbia citriodora*.

Nº ensaios	Condições do ensaio do lixamento			Média	Desvio Padrão
	Madeira	Temperatura	Granulometria		
1	<i>C. citriodora</i>	NT	100 mesh	22,55 m/s^2	$\pm 1,38 \text{ m/s}^2$
2	<i>C. citriodora</i>	NT	120 mesh	23,89 m/s^2	$\pm 1,61 \text{ m/s}^2$
3	<i>C. citriodora</i>	NT	150 mesh	24,24 m/s^2	$\pm 1,35 \text{ m/s}^2$
4	<i>C. citriodora</i>	NT	220 mesh	24,25 m/s^2	$\pm 1,10 \text{ m/s}^2$
5	<i>C. citriodora</i>	80°C	100 mesh	22,55 m/s^2	$\pm 1,38 \text{ m/s}^2$
6	<i>C. citriodora</i>	80°C	120 mesh	24,98 m/s^2	$\pm 0,12 \text{ m/s}^2$
7	<i>C. citriodora</i>	80°C	150 mesh	22,24 m/s^2	$\pm 3,15 \text{ m/s}^2$
8	<i>C. citriodora</i>	80°C	220 mesh	24,70 m/s^2	$\pm 0,26 \text{ m/s}^2$
9	<i>C. citriodora</i>	120°C	100 mesh	21,42 m/s^2	$\pm 2,33 \text{ m/s}^2$
10	<i>C. citriodora</i>	120°C	120 mesh	24,79 m/s^2	$\pm 0,43 \text{ m/s}^2$
11	<i>C. citriodora</i>	120°C	150 mesh	19,26 m/s^2	$\pm 1,17 \text{ m/s}^2$
12	<i>C. citriodora</i>	120°C	220 mesh	25,00 m/s^2	$\pm 0,04 \text{ m/s}^2$
13	<i>C. citriodora</i>	160°C	100 mesh	22,58 m/s^2	$\pm 1,44 \text{ m/s}^2$
14	<i>C. citriodora</i>	160°C	120 mesh	24,93 m/s^2	$\pm 0,08 \text{ m/s}^2$
15	<i>C. citriodora</i>	160°C	150 mesh	23,83 m/s^2	$\pm 2,03 \text{ m/s}^2$
16	<i>C. citriodora</i>	160°C	220 mesh	25,04 m/s^2	$\pm 0,15 \text{ m/s}^2$
17	<i>C. citriodora</i>	200°C	100 mesh	22,73 m/s^2	$\pm 2,08 \text{ m/s}^2$
18	<i>C. citriodora</i>	200°C	120 mesh	25,06 m/s^2	$\pm 0,09 \text{ m/s}^2$
19	<i>C. citriodora</i>	200°C	150 mesh	23,07 m/s^2	$\pm 2,32 \text{ m/s}^2$
20	<i>C. citriodora</i>	200°C	220 mesh	25,01 m/s^2	$\pm 0,04 \text{ m/s}^2$

**Tabela 42-** Continuação dos valores descritivos da vibração (m/s^2) em relação às condições de ensaio do experimento fatorial completo (L_{40}) do lixamento do *Pinus elliottii*.

Nº ensaios	Condições do Lixamento			Média	Desvio Padrão
	Madeira	Temperatura	Granulometria		
21	<i>P. elliottii</i>	NT	100 mesh	24,97 m/s^2	$\pm 0,08 \text{ m/s}^2$
22	<i>P. elliottii</i>	NT	120 mesh	24,83 m/s^2	$\pm 0,28 \text{ m/s}^2$
23	<i>P. elliottii</i>	NT	150 mesh	24,69 m/s^2	$\pm 0,47 \text{ m/s}^2$
24	<i>P. elliottii</i>	NT	220 mesh	23,91 m/s^2	$\pm 1,51 \text{ m/s}^2$
25	<i>P. elliottii</i>	80°C	100 mesh	24,73 m/s^2	$\pm 0,41 \text{ m/s}^2$
26	<i>P. elliottii</i>	80°C	120 mesh	24,91 m/s^2	$\pm 0,07 \text{ m/s}^2$
27	<i>P. elliottii</i>	80°C	150 mesh	24,74 m/s^2	$\pm 0,37 \text{ m/s}^2$
28	<i>P. elliottii</i>	80°C	220 mesh	24,87 m/s^2	$\pm 0,28 \text{ m/s}^2$
29	<i>P. elliottii</i>	120°C	100 mesh	24,74 m/s^2	$\pm 0,86 \text{ m/s}^2$
30	<i>P. elliottii</i>	120°C	120 mesh	24,83 m/s^2	$\pm 0,11 \text{ m/s}^2$
31	<i>P. elliottii</i>	120°C	150 mesh	25,02 m/s^2	$\pm 0,07 \text{ m/s}^2$
32	<i>P. elliottii</i>	120°C	220 mesh	24,90 m/s^2	$\pm 0,07 \text{ m/s}^2$
33	<i>P. elliottii</i>	160°C	100 mesh	23,31 m/s^2	$\pm 1,93 \text{ m/s}^2$
34	<i>P. elliottii</i>	160°C	120 mesh	24,92 m/s^2	$\pm 0,06 \text{ m/s}^2$
35	<i>P. elliottii</i>	160°C	150 mesh	25,01 m/s^2	$\pm 0,08 \text{ m/s}^2$
36	<i>P. elliottii</i>	160°C	220 mesh	24,98 m/s^2	$\pm 0,03 \text{ m/s}^2$
37	<i>P. elliottii</i>	200°C	100 mesh	24,14 m/s^2	$\pm 7,57 \text{ m/s}^2$
38	<i>P. elliottii</i>	200°C	120 mesh	25,02 m/s^2	$\pm 0,06 \text{ m/s}^2$
39	<i>P. elliottii</i>	200°C	150 mesh	25,01 m/s^2	$\pm 0,07 \text{ m/s}^2$
40	<i>P. elliottii</i>	200°C	220mesh	25,04 m/s^2	$\pm 0,09 \text{ m/s}^2$

Fonte: próprio autor *NT= Não termorretificada

O comportamento dos dados das Tabelas 41 e 42 podem ser visualizados no gráfico de dispersão da Figura 34, complementado pelo gráfico de superfície 3D da Figura 35 que relaciona a vibração com as rugosidades R_a e $R_{\text{máx}}$.



Figura 34 - Gráfico de dispersão da matriz completa L_{40} relacionando os fatores rugosidade média e vibração (m/s^2) no processo de lixamento.

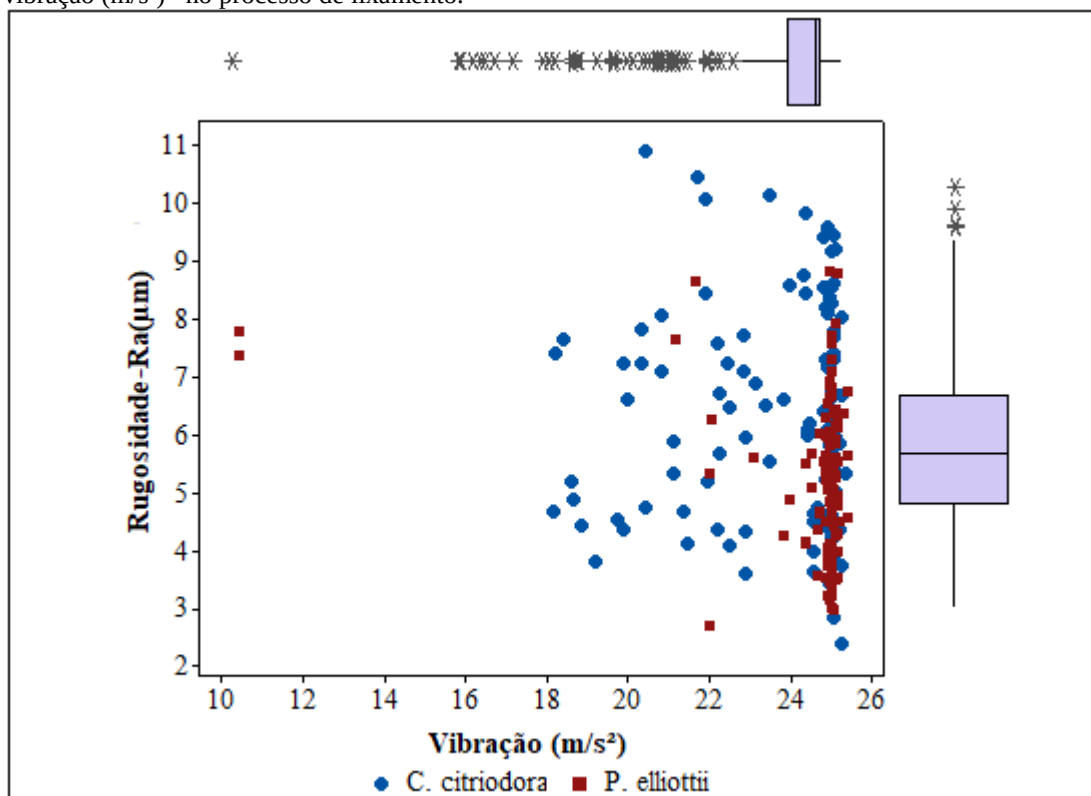
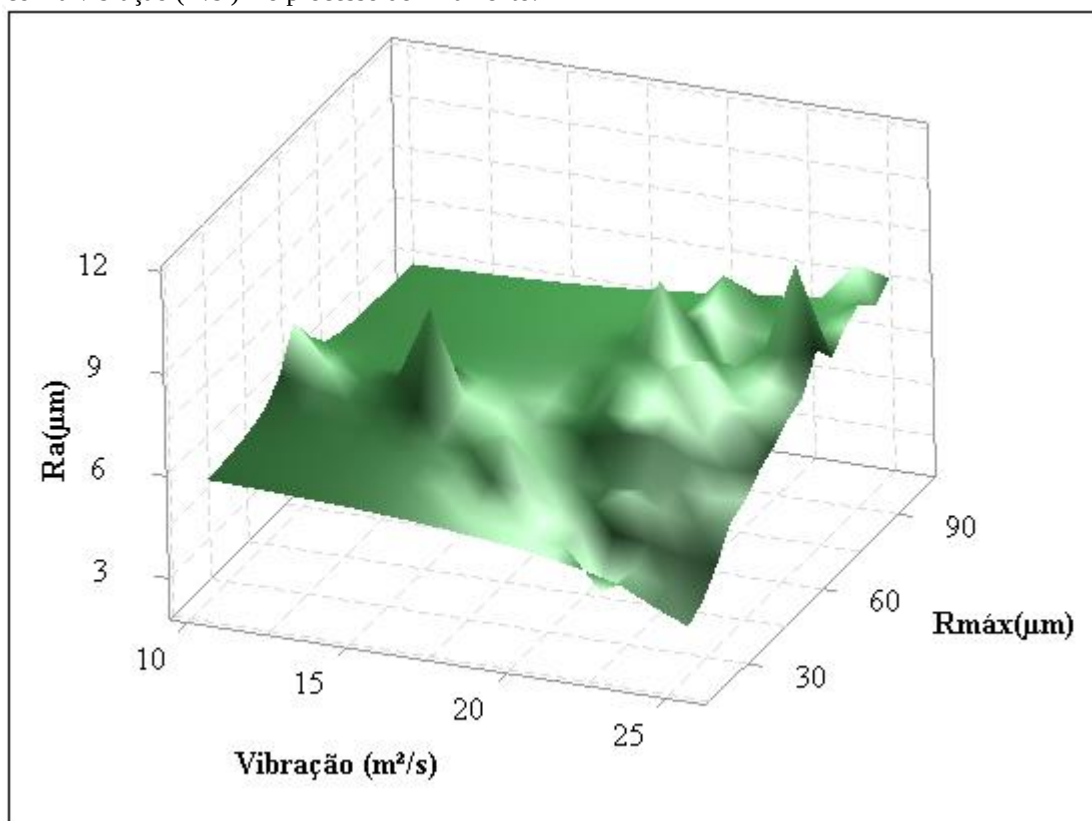


Figura 35 - Gráfico de superfície 3D da matriz completa L_{40} em relação as rugosidades média e máxima com a vibração (m/s^2) no processo de lixamento.





Observando o comportamento descritivo dos dados das Tabelas 41 e 42, nota-se que não houve um comportamento padrão da vibração no processo de lixamento para ambas as madeiras e os valores apresentaram-se próximos. No entanto, por meio do gráfico de dispersão da Figura 34, nota-se a tendência do sistema oscilar com menor variação da vibração com o processamento do *Pinus elliotti*, porém alcançando os maiores valores da matriz de dados, sendo estes considerados *outliers*, enquanto o *Corymbia citriodora*, obteve maior variabilidade dos dados que encontraram-se dispersos e com uma quantidade significativa de *outliers*.

A Figura 35 mostrou uma superfície que tendeu a lisura, porém apresentou irregularidades devido a formação de picos e acentuados vales, formados principalmente com o aumento da vibração do sistema. Esta tendência a lisura, ou seja, a ser constante a vibração, indica no início da investigação um quadro de correlação de baixa intensidade entre os fatores vibração e rugosidade.

Uma hipótese para estes resultados iniciais é a questão anatômica da madeira, um indicativo disto é dispersão dos dados apresentando grande variabilidade e diferença entre as espécies de madeira. No entanto, afim de investigar se esta hipótese é válida, bem como analisar o comportamento da vibração, fez inicialmente a análise de variância (ANOVA), alcançado antes às pressuposições de normalidade e homogeneidade da matriz de dados L_{32} cujos valores do *p-valor* do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente 0,05910 e 0,7128, os quais foram obtidos após transformação logarítmica e retirada de *outliers*. O resultado da ANOVA encontra-se na Tabela 43.

Tabela 43-ANOVA com a matriz L_{32} , experimento fatorial completo com as madeiras termorretrificadas para análise da potência

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<i>mesh</i>	3	0,0266	0,00886	1,696	0,171558
Temperatura	3	0,1099	0,03662	7,006	0,000220***
Madeira	1	0,0037	0,00374	0,716	0,399214
<i>mesh</i> *Temperatura	9	0,0537	0,00597	1,142	0,338939
<i>mesh</i> *Madeira	3	0,1110	0,03699	7,077	0,000201***
Temperatura*Madeira	3	0,00652	0,002173	0,416	0,742027
<i>mesh</i> *Temperatura*Madeira	5	0,1239	0,02479	4,742	0,000543***
Erro	121	0,63246	0,005227		
Total	148	1,06778			
Sumário do Modelo: S= 0,0774796 $R^2 = 29,16\%$ $R^2(aj) = 16,79\%$ $R^2(pred) = 0,00\%$					

*** Nível de significância: 0`\*\*\*\*` 0,001`\*\*` 0,01`\*`

Fonte: elaborada pelo autor



Segundo o resultado da Tabela 43 pode-se constatar que a o único fator individual significativo foi a temperatura de termorretificação, juntamente com a relação entre os fatores e a relação granulometria da lixa e madeira, a qual foi analisada no gráfico de interação da Figura 36 e complementada como resultado de Tukey Tabela 44.

Figura 36 - Gráfico de interação entre os fatores granulometria da lixa e espécie de madeira em relação ao comportamento da vibração (m/s^2)

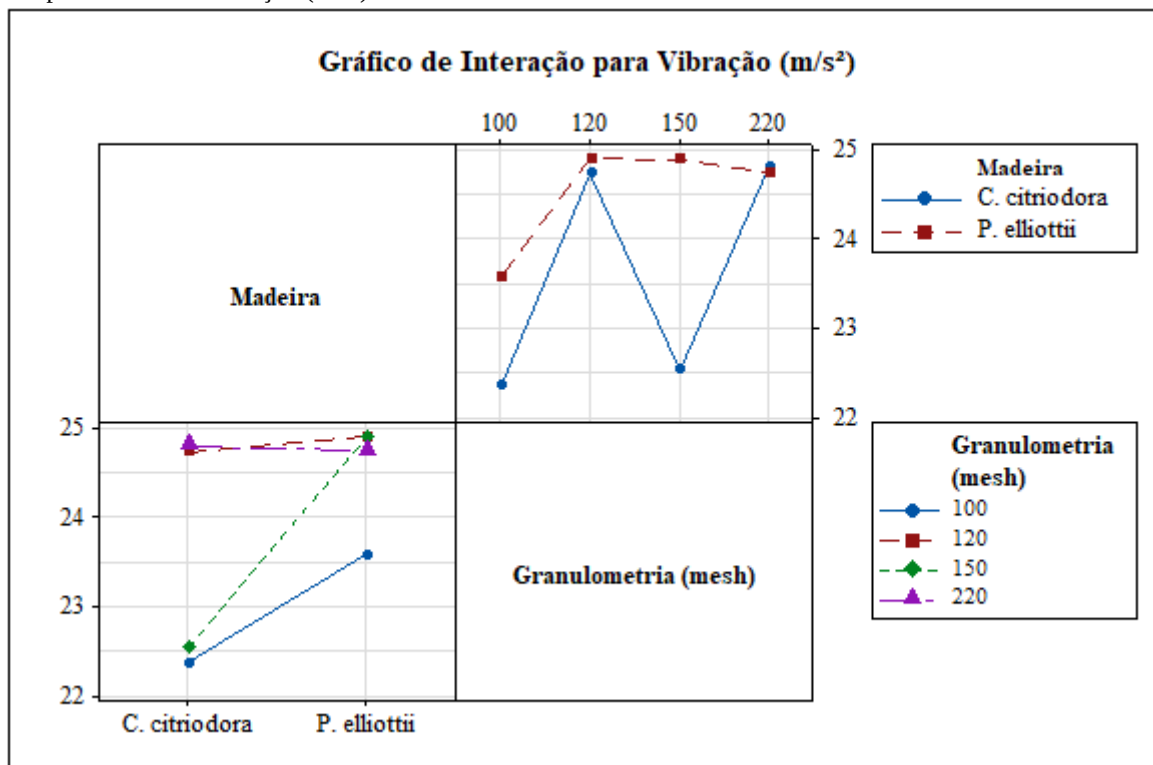


Tabela 44-Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95% da relação dos fatores madeira e granulometria da lixa no valor da média da vibração

Madeira*Granulometria	N	Média	Agrupamento
<i>Corymbia citriodora</i> 120 mesh	20	25,0182	A B
<i>Pinus elliottii</i> 150 mesh	28	25,0155	A
<i>Corymbia citriodora</i> 220 mesh	16	25,0127	A B
<i>Pinus elliottii</i> 220 mesh	29	24,9870	A B
<i>Corymbia citriodora</i> 150 mesh	12	24,9781	A B
<i>Pinus elliottii</i> 100 mesh	17	24,9710	A B
<i>Pinus elliottii</i> 120 mesh	23	24,9439	B
<i>Corymbia citriodora</i> 100 mesh	4	24,8879	A B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.



Por meio da interpretação da Figura 36 e complementada pelas informações da Tabela 44 têm-se as seguintes considerações:

- a) Houve maior oscilação do sistema com o lixamento do *Corymbia citriodora*, no entanto, o resultado de *Tukey* mostrou que não há diferença significativa entre as médias da vibração.
- b) O *Pinus elliottii* apresentou graficamente a tendência de manter a vibração constante ao longo do processo de lixamento, mas segundo o resultado do teste de *Tukey* a vibração do sistema é diferente quando a madeira é processada a 120 e 150 *mesh*, sendo estas as únicas condições de diferença.

Discussão dos Resultados

Ao analisar a matriz de dados os valores da vibração do *Corymbia citriodora* com a lixa de 100 *mesh* para as temperaturas de termorretificação de 120, 160 e 200°C, foram considerados como *outliers* no teste de normalidade, podendo ser identificados por meio das irregularidades da superfície mostradas na Figura 35. Mesmo executando a transformação logarítmica e Box-Cox da matriz de dados, ainda assim, não alcançou as pressuposições de normalidade e heterogeneidade.

Por isso, a temperatura de termorretificação mostrou ser o único fator individual significativo, no entanto, feito a análise de variância para as condições consideradas *outliers* do *Corymbia citriodora*, pode-se constatar que não houve significância em relação a temperatura de termorretificação, a qual mostrou correlação fraca, pois o valor do coeficiente foi 0,26. Ressaltando que para análise de variância alcançou primeiramente os testes de normalidade e heterogeneidade com valores do *p-valor* do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* respectivamente de 0,344 e 0,7015.

Além disso, os fatores individuais e interagindo em sua maioria não foram significativos no comportamento da vibração e mesmo a relação significativa, granulometria da lixa e espécie de madeira, apresentou apenas diferenciação entre as lixas de 120 e 150 *mesh* para o *Pinus elliottii*, enquanto as demais foram iguais e cuja variação possivelmente ocorreu por características anatômicas pontuais nas madeiras.



Devido a isto, o valor do coeficiente de determinação R^2 que mede o quanto a variável resposta é explicada pelo modelo foi nulo alcançando o preditivo de 0%, indicando que não são esses os fatores responsáveis por variar o comportamento da vibração, ou seja, 100% da variabilidade total do sistema de lixamento é devido a outros fatores que não foram investigados, podendo ser estes, referentes ao maquinário como pressão, velocidade, força de lixamento ou até mesmo mudando as espécies de madeira e granulometrias da lixa. A Tabela 45 reitera a explicação anterior, confirmando a correlação bem fraca dos fatores em relação a vibração; e mostrando a tendência da potência diminuir o seu valor com o aumento da vibração.

Tabela 45- Coeficientes dos fatores formados pelo matiz de correlação.

Fatores	Madeira	Temperatura	Granulometria	Potência	Rugosidade
Coeficiente	0,11	0,05	0,14	-0,29	0,034

▪ **Investigação do comportamento da vibração no processo de lixamento das madeiras sem tratamento térmico *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii***

Sabido do poder preditivo nulo apresentado na Tabela 43 supôs que o mesmo resultado ocorreria com a matriz de dados L₈, com as condições de lixamento das madeiras sem tratamento térmico. Porém, para confirmar as suspeitas fez a investigação, alcançando as pressuposições de normalidade e heterogeneidade, pois *p-valor* do *Shapiro-Wilk* e *Fligner-Killeen* foram respectivamente a 0,08761 e 0,7193, sendo necessário a retirada dos dados da vibração referentes a lixa de 100 *mesh* os quais foram considerados *outliers* no teste de normalidade. O resultado esta na Tabela 46.

Tabela 46 - ANOVA com a matriz L₈, experimento fatorial completo para analisar a vibração do sistema de lixamento no processamento das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*

Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Madeira	1	0,01161	0,011605	0,68	0,425
Granulometria	3	0,0116	0,003428	0,194	0,900
Madeira*Granulometria	2	0,0156	0,007824	0,443	0,647
Erro	27	0,4772	0,017675		
Total	33	0,51476			

Sumário do Modelo: S= 0,130366 $R^2 = 4,25\%$ $R^2(\text{aj}) = 0,00\%$ $R^2(\text{pred}) = 0,00\%$

Nível de significância: 0`\*\*\*`0,01`\*`

Fonte: elaborada pelo autor



O resultado da Tabela 46 mostra que não há relação significativa entre os fatores espécies de madeira e granulometria da lixa, revelando também pelo R^2 (aj) e (pred) nulos, confirmando então as suspeitas iniciais. Tal resultado é consequente dos baixos coeficientes de correlação como mostra a Tabela 47.

Tabela 47- Coeficientes dos fatores formados pelo matiz de correlação

Fatores	Madeira	Granulometria	Potência	Rugosidade
Coeficiente	-0,09	-0,08	-0,013	-0,21

Por meio da Tabela 47 nota-se que os coeficientes obtiveram intensidade bem fraca para todos os fatores estipulados na análise, portanto o motivo do comportamento da lixa de 100 *mesh* em relação as demais, torna-se vago, podendo ser devido a questões anatômicas pontuais, granulometria da lixa ou até mesmo erros de medições.

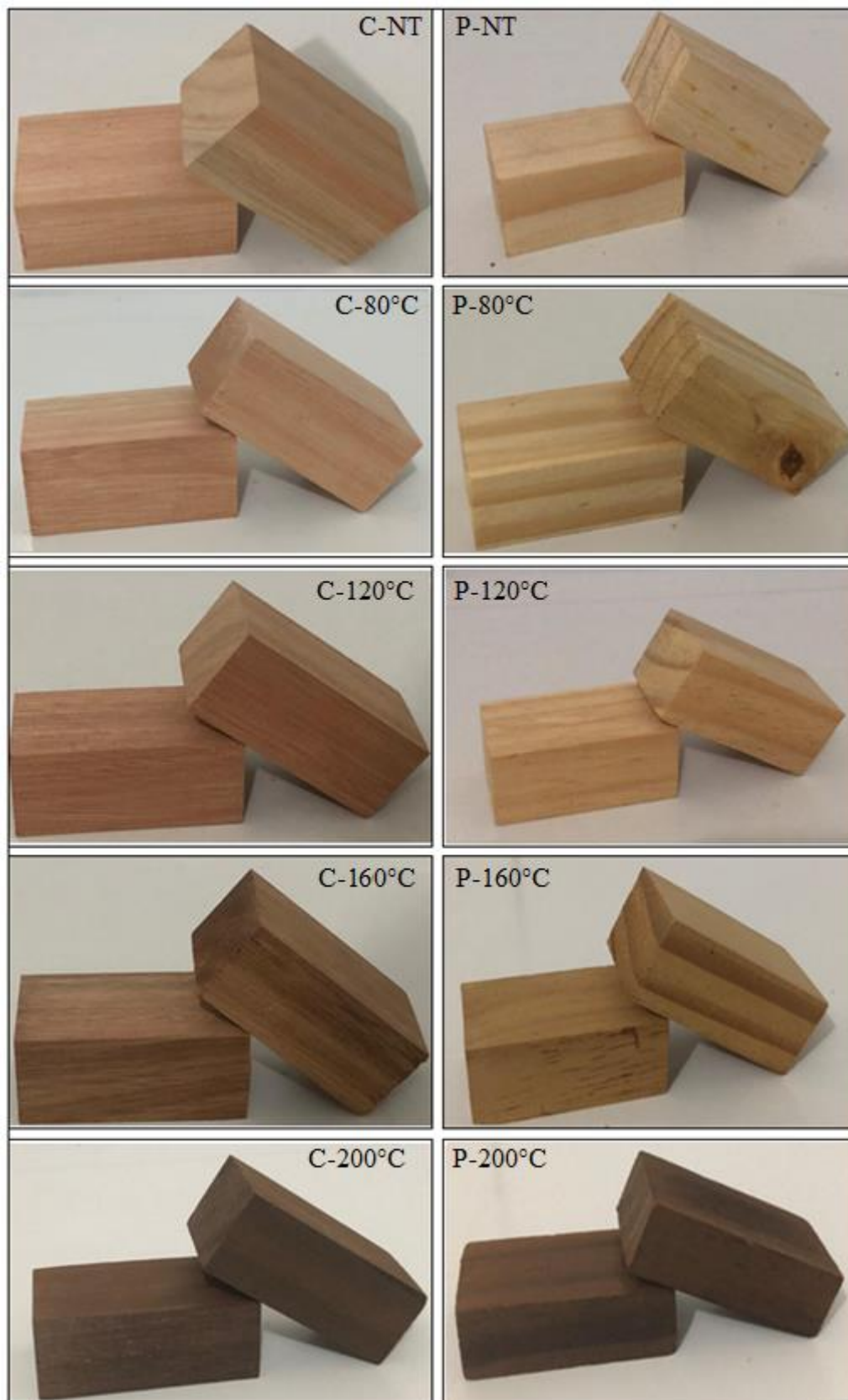
Assim como o resultado apresentado para as madeiras termorretificada, têm-se indícios que há outras variáveis que contribuem com maior intensidade no comportamento da vibração, as quais já foram mencionadas anteriormente.

6.4. COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE O ASPECTO DA MADEIRA MODIFICADA TERMICAMENTE E IMAGEM MICROSCÓPICA (MEV)

Além das imagens microscópicas (MEV) das superfícies das madeiras processadas do *Corymbia citriodora*, Figuras 38 e 39 e *Pinus elliottii*, Figuras 40 e 41 tem também a Figura 37 que mostra a mudança da coloração das madeiras *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* antes e após serem termorretificadas nos gradientes de temperatura estipulados.



Figura 37- Aspecto visual das madeiras *C.citriodora* a e *Pinus elliottii* modificada termicamente.





Através da Figura 37 pode-se observar que a aparência natural da madeira, ou seja, quando não termorretificada (NT) foi modificada com a aplicação do tratamento térmico que acarretou mudança na coloração em todas as regiões e faces da madeira, havendo seu escurecimento acentuado conforme o aumento da temperatura de termorretificação.

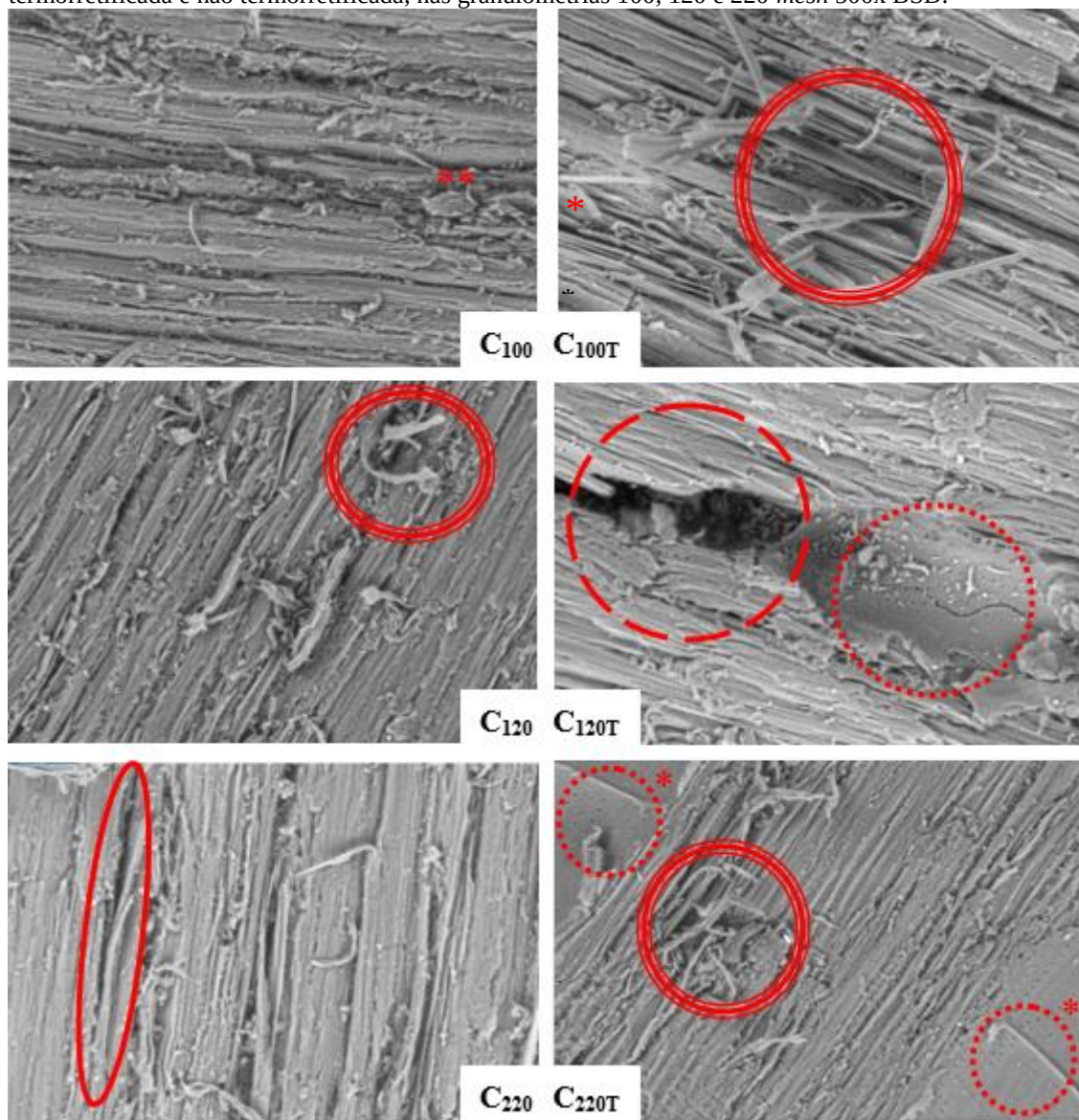
O *Corymbia citriodora* termorretificado a 80°C aparentou cor rosa-acinzentado e visualmente não se distinguiu da coloração natural, resultado esperado pois a modificação da madeira ocorre substancialmente acima de 120°C, quando as hemiceluloses são afetadas, sendo possível notar na Figura 37 seu escurecimento nesta temperatura alcançando cor semelhante à rosa, como a do Jequitibá-rosa. O processo de termorretificação a 160°C produziu uma madeira com cor similar ao marrom-claro (avermelhado) como a da Andiroba e a 200°C ficou próxima a marrom-escuro, mesma cor do Ipê roxo.

A coloração do *Pinus elliottii* aparentemente modificou-se da coloração branca semelhante a madeira *Hevea* para marrom-escuro, no entanto comparado ao *Corymbia citriodora*, sua cor foi mais clara mesmo termorretificada, exceto na temperatura de 200°C, pois ficaram próximas, por causa da degradação das hemiceluloses.

Em relação a estética da madeira percebe-se que até a temperatura de 160°C é possível visualizar os anéis de crescimento, veios e nuances da madeira que são características atrativas para tornar o produto singular e naturalista. No entanto, a 200°C criou para ambas as espécies uma superfície com aspecto homogêneo, principalmente para o *Corymbia citriodora*, mas que, no entanto, pode ser realçada deixando ainda mais atrativa com aplicação de verniz.



Figura 38 - Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do *Corymbia citriodora* termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh 500x BSD.



Legendas:

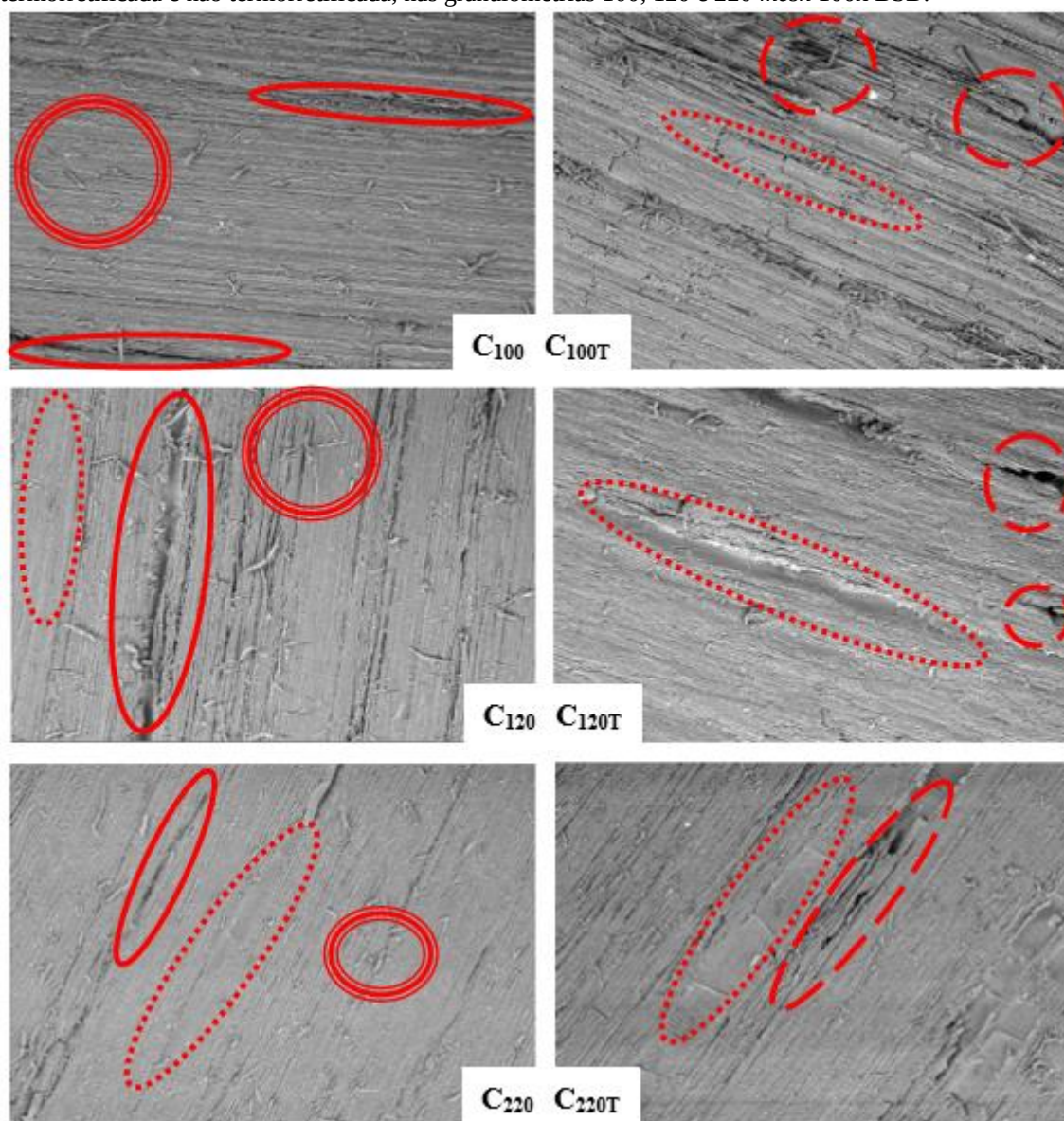
C₁₀₀, C₁₂₀ e C₂₂₀ (superfície do *Corymbia citriodora* não termorretificada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh)

C_{100T}, C_{120T} e C_{220T} (superfície do *Corymbia citriodora* termorretificada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh). Imagem com ampliação de 500x BSD.

.....	Área de compactação
=====	Fibras fragmentadas
**	Impregnação do grão abrasivo
—————	Micro rachaduras
*	Poros
- - - - -	Vales



Figura 39 - Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do *Corymbia citriodora* termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh 100x BSD.



Legendas:

C₁₀₀, C₁₂₀ e C₂₂₀ (superfície do *Corymbia citriodora* não termorretificada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh)

C_{100T}, C_{120T} e C_{220T} (superfície do *Corymbia citriodora* termorretificada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh). Imagem com ampliação de 100x BSD.

-----	Área de compactação
=====	Fibras fragmentadas
**	Impregnação do grão abrasivo
—————	Micro rachaduras
*	Poros
— — — — —	Vales

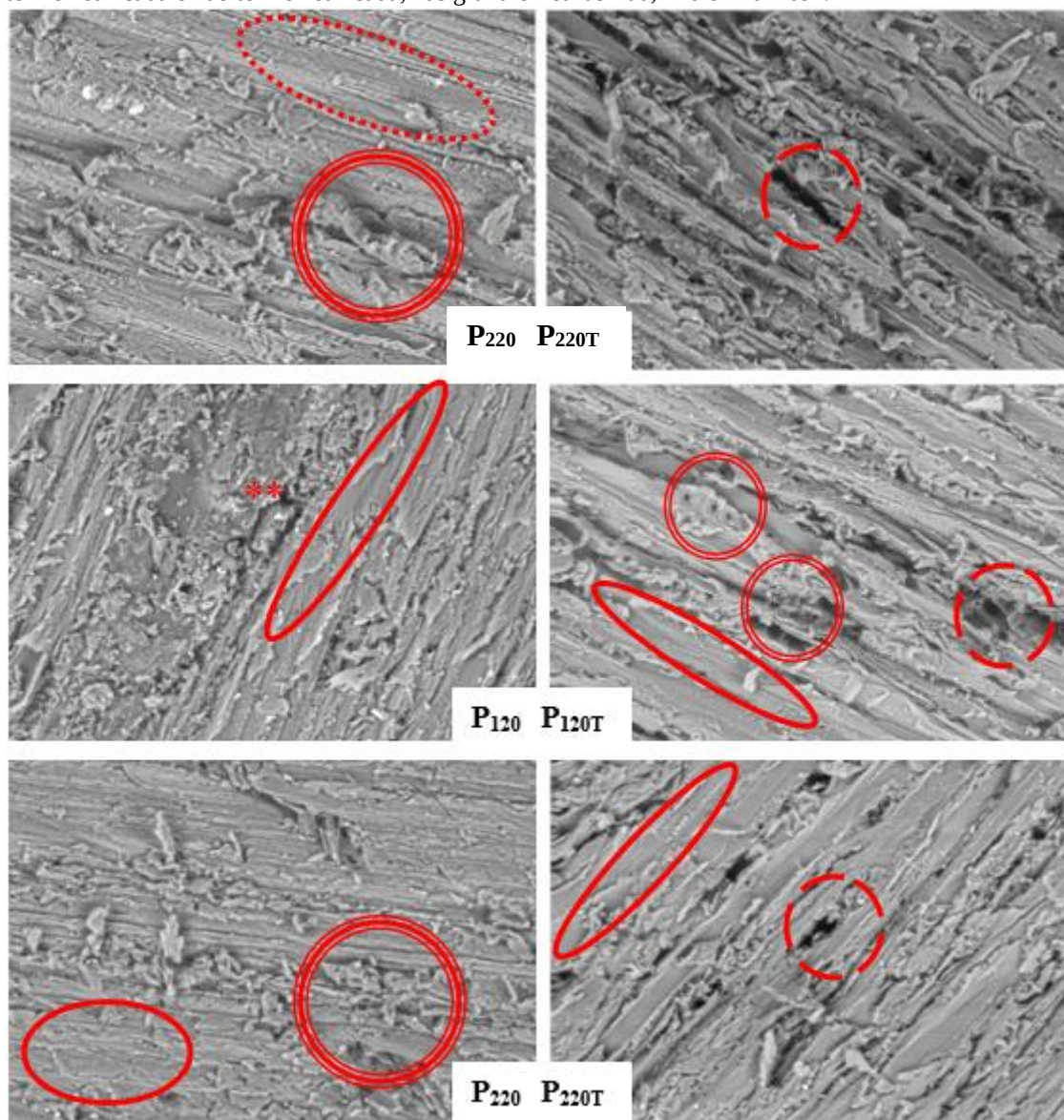


Observando as Figuras 38 e 39 têm-se as seguintes considerações:

- a) Em relação ao *Corymbia citriodora* não termorretificado observasse que a superfície lixada apresentou dois elementos característicos independente da granulometria da lixa que são fibras fragmentadas e regiões de aparente micro rachaduras. Isto mostra que no processo de lixamento o grão abrasivo independentemente do tamanho não consegue remover as fibras por completo, e quando consegue , geram depressões parecidas com micro rachaduras.
- b) Quanto ao *Corymbia citriodora* termorretificado pode-se notar que a superfície apresentou três elementos característicos independente da granulometria da lixa que são fibras fragmentadas , regiões com profundos vales e áreas de compactação das fibras. Tais elementos revelam o mecanismo de atuação do grão abrasivo no processo de lixamento, o qual age utilizando a força de cisalhamento e de compressão, a primeira retira as fibras da madeira por completo podendo até criar pequenos vales profundos ou as deixam fragmentadas na superfície, enquanto a de compressão, esmaga e desgasta as fibras, criando áreas descontínuas, compactadas e com depressões possíveis de observar os poros da madeira. A força de compressão é acentuada no processo devido a dois motivos, primeiro ao formato do grão abrasivo do óxido de alumínio que é arredondado, dificultando assim a ação cortante ; e ao empastamento da lixa, que ocorre ao longo do processo de lixamento, principalmente das madeiras termorretificadas, pois o cavaco vira praticamente pó, facilitando a impregnação do particulado entre os grãos da lixa.



Figura 40 - Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do *Pinus elliottii* termorreteficada e não termorreteficada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh.



Legendas:

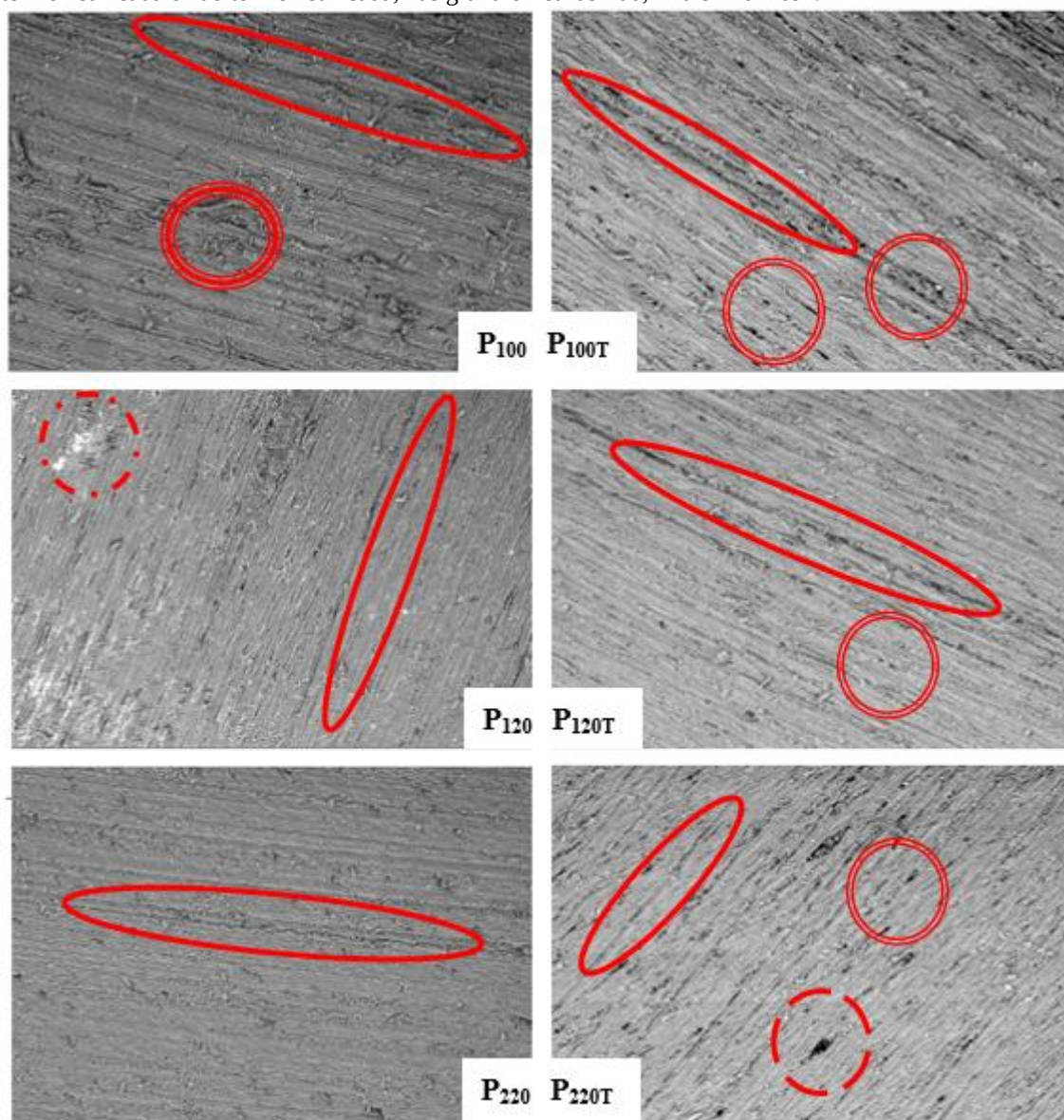
P₁₀₀, **P₁₂₀** e **P₂₂₀** (superfície do *Pinus elliottii* não termorreteficada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh)

P_{100T}, **P_{120T}** e **P_{220T}** (superfície do *Pinus elliottii* termorreteficada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh). Imagem com ampliação de 500x BSD.

**	Impregnação do grão abrasivo
	Linhas de compactação das traqueídes
	Material fragmentadas
	Pontuações das traqueídes
	Vales



Figura 41 -Imagem microscópica (MEV) comparando a superfície da madeira do *Pinus elliottii* termorretificada e não termorretificada, nas granulometrias 100, 120 e 220 mesh.



Legenda: **P₁₀₀**, **P₁₂₀** e **P₂₂₀** (superfície do *Pinus elliottii* não termorretificada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh) e **P_{100T}**, **P_{120T}** e **P_{220T}** (superfície do *Pinus elliottii* termorretificada e processada respectivamente com as lixas de 100, 120 e 220 mesh). Imagem com ampliação de 100x BSD.
Fonte: próprio autor

**	Impregnação do grão abrasivo
	Linhas de compactação e material
	Material fragmentadas
	Pontuações das traqueídes
	Resina
	Vales



Observando as Figuras 40 e 41 têm-se as seguintes considerações:

a) Em relação ao processamento do *Pinus elliottii* sem tratamento térmico nota-se que a superfície independentemente da granulometria da lixa apresentou dois elementos característicos, fibras fragmentadas e material compactado. A formação destes elementos mostra que o grão abrasivo utilizou a força de cisalhamento para remover as fibras, as quais foram desgastadas pelo atrito sendo algumas retiradas enquanto outras se mantiveram na superfície. Além desta força, usou a de compressão que compactou o material, gerando um aspecto de esmagamento da superfície, sendo isto notado em grande parte do material indicando por isso maior atuação desta força ao longo do lixamento do que a de cisalhamento. Um dos motivos disto pode ser devido à geometria do óxido de alumínio ser arredondada, não atuando com severidade na peça ; e pelas características da madeira, por apresentar baixa densidade e poros, que contribuíram para o grão deformar mais do que cisalhar o material, além de potencializar o empastamento da lixa que se acentua devido a liberação da resina contribuindo para o abrasivo agir pressionando mais material do que de fato, removendo.

b) Em relação ao *Pinus elliottii* termorretificado observa-se que a superfície apresentou quatro elementos característicos, independente da granulometria da lixa usada no processo, que são fibras fragmentadas, pequenos vales, pontuações das traqueídes e linhas de compactação de material. A formação de pequenos vales e pontuações das traqueídes indicam que o grão abrasivo por meio da sua ação cisalhante, conseguiu penetrar com mais profundidade no material, fragmentando as fibras e criando pequenos vasos , sendo possível até visualizar as pontuações das traqueídes. No entanto, mesmo com a facilidade de remoção do grão, devido a menor resistência mecânica do material após a termorretificação, nota-se mais material compactado do que removido.



_____ Discussão dos Resultados: comparação visual entre os aspectos da madeira modificada termicamente e imagem microscópica - MEV das espécies *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*.

Com o processo de termorretificação foi possível modificar a coloração das espécies, transformando-as visualmente em outros tipos de madeira com tonalidade próximas ao Andiroba e Ipê roxo, madeiras de lei de alto valor comercial, mostrando-se portanto, um meio eco eficiente e viável para fins estéticos, aplicado para diversificar a fabricação de produtos satisfazendo setores do mercado moveleiro, de piso engenheirado, assoalhos e dentre outros.

Em relação ao acabamento superficial após o lixamento pode-se diagnosticar que o processo remove ao mesmo tempo que causa imperfeições na superfície, como formação de fibras fragmentadas, vales, impregnação do grão abrasivo e compactação de material. Estas imperfeições são causadas pelas marcas impressas do grão abrasivo na superfície da madeira, provenientes da ação da força de cisalhamento e de compressão exercidas no processo de lixamento.

Pode-se observar que o óxido de alumínio modificou a superfície da madeira compactando mais material do que retirando, indicando maior atuação da força de compressão que a de cisalhamento, consequência da geometria arredondada do grão, a qual reduz a capacidade de corte devido a diminuição da friabilidade.

Quanto ao comportamento das madeiras em relação a ação do grão, notou-se que o *Corymbia citriodora* apresentou maior fragmentação das fibras, micro rachaduras, e vales profundos, enquanto o *Pinus elliottii* vasos rasos e superfície mais compactada, com aparência de esmagamento.

Tal comportamento está relacionado com a densidade do material, o *Corymbia citriodora* por ter maior densidade proporcionou maior resistência mecânica a ação do abrasivo gerando maior atrito do grão, o qual atacou com maior intensidade a peça. Além disso, quando termorretificado as fibras tornaram-se mais fáceis de serem cisalhadas, sendo removidas como se fossem lascas cujo rompimento pode deixar profundas depressões. Enquanto, o *Pinus elliotti* por ter menor densidade, porosidade e resina, absorve o impacto do grão abrasivo e dificulta a ação do corte que atua comprimindo a superfície, gerando uma superfície com aspecto de amassada.



7. CONCLUSÕES

A conclusão está disposta nos tópicos a seguir, sendo também abordado sugestões para futuras pesquisas envolvendo o processo de lixamento da madeira.

Métodos aplicados: Taguchi e Experimento Fatorial Completo

Dentre os métodos aplicados para investigação o método de Taguchi em comparação com o experimento fatorial completo, descartou relações significativas, aumentou as condições de igualdade do teste de *Tukey* diferenciando-se quanto ao agrupamento dos resultados, não projetou o gráfico de interação igual à do experimento fatorial completo, que mostrou ser mais explicativo e preciso devido ao melhor ajuste dos dados. Porém, apresentou resultado próximo ao gráfico de efeitos principais e junto com aplicação do sinal-ruído descreveu o comportamento gráfico da rugosidade condizente com os resultados da investigação estatística realizada com o experimento fatorial completo.

Pode-se concluir que o método de Taguchi devido à redução das condições experimentais mais projeta a tendência do comportamento dos parâmetros, do que de fato constata. No entanto, tal projeção mostra resultados que tendem a ser esperados quando realiza o experimento fatorial completo, se tornando por isso, um meio importante e eficiente para analisar o processo de forma prévia, principalmente quando se tem uma gama de variáveis de entrada possibilitando selecioná-las de acordo com a maior intensidade de relação com os parâmetros investigados, arranjando assim, o planejamento experimental fatorial completo com maior assertividade e consequentemente obtendo informações com maior relevância.

Por exemplo, um dos objetivos desta tese era criar uma tabela de lixa como foi proposto por Leite *et. al* 2019, mas não foi realizado devido aos níveis de fatores estabelecidos na pesquisa mostrarem baixa influência no comportamento dos parâmetros analisados, pois constatou com a investigação dos dados que os fatores estabelecidos influenciaram apenas 33,09% no comportamento da rugosidade, 23,37% na potência em relação as madeiras termorretificadas, e sendo nulo para vibração. Isto poderia ter sido facilmente ajustado com uma prévia investigação utilizando o método de Taguchi, o qual



direcionaria o planejamento experimental, possibilitando testar variáveis com maior intensidade de correlação com os parâmetros analisados, tornando o experimento mais assertivo e com segurança de melhores resultados.

_____ Termorretificação

A termorretificação modificou a coloração das espécies transformando-as visualmente em outros tipos de madeira com tonalidades próximas as de alto valor comercial. Mostrando-se por isso, um meio eco eficiente e viável para fins estéticos. Além disso, a temperatura de termorretificação não interferiu significativamente nos parâmetros rugosidade, potência e vibração do processo de lixamento, tornando seu processamento fácil para padronização.

_____ Processo de lixamento

A seguir estão dispostas as informações conclusivas a respeito da análise investigativa e analítica em relação ao processo de lixamento com lixas de óxido de alumínio.

➤ Estas informações são para o processamento do *Corymbia citriodora* tratado termicamente em algumas destas temperaturas de termorretificação 80, 120, 160 e 200°C em que pode ser utilizados diferentes possibilidades de estoque com as lixas de 100, 120, 150 e 220 *mesh*, que estão dispostas a seguir:

- Madeira termorretificada a 200°C pode ser processada com quaisquer lixas no estoque de 100, 120, 150 e 220 *mesh* ($6,78 \pm 0,18 \mu\text{m}$).
- Madeira termorretificada a 160°C pode ser processada com quaisquer lixas no estoque de 100, 120 e 150 *mesh* ($7,14 \pm 0,96 \mu\text{m}$), estoque com lixas de 120 ou 150 *mesh* ($6,47 \pm 0,67 \mu\text{m}$), estoque com lixas de 150 ou 220 *mesh* ($5,16 \pm 0,90 \mu\text{m}$).
- Madeira termorretificada a 120°C pode ser processada com quaisquer lixas no estoque de 120, 150 e 220 *mesh* ($5,11 \pm 0,75 \mu\text{m}$), estoque com lixas de 100 ou 120 *mesh* ($7,20 \pm 0,65 \mu\text{m}$) e lixas no estoque de 120 ou 220 *mesh* ($5,83 \pm 1,02 \mu\text{m}$).



- Madeira termorretificada a 80°C pode ser processada com as lixas de 100 ou 120 *mesh* ($7,03 \pm 0,51 \mu\text{m}$), 120 ou 150 *mesh* ($5,92 \pm 0,74 \mu\text{m}$), ou quaisquer lixas de 100,120 e 150 *mesh* ($6,41 \pm 0,92 \mu\text{m}$) e 120, 150 e 220 *mesh* ($5,47 \pm 0,88 \mu\text{m}$).
- Caso o *Corymbia citriodora* seja utilizado termorretificado nas temperaturas de 80, 120, 160 e 200°C e pretende-se alcançar valores da rugosidade em torno de $6,35 \pm 1,82 \mu\text{m}$, pode-se utilizar quaisquer uma destas lixas de 100,120, 150 e 220 *mesh* que estão disponíveis no estoque. Sendo que a variação do valor da rugosidade é devido a questões anatômicas da madeira e não pela escolha da lixa. Porém, se deseja ter uma faixa de rugosidade mais precisa, basta verificar as informações anteriores.
- O *P. elliotti* não apresentou relação significativa entre os fatores granulometria da lixa e temperatura de termorretificação. Por isso, não precisa manter um estoque com lixas de 100, 120, 150 e 220 *mesh* para processar madeiras termorretificadas a 80,120,160 e 200°C, basta optar por uma apenas, que o valor médio da rugosidade será em torno de $5,40 \pm 1,63 \mu\text{m}$, cuja variação do valor é devido a questões anatômicas da madeira.
- As lixas de 100, 120, 150 e 220 *mesh* não mostraram relação significativa no valor da rugosidade das madeiras sem tratamento térmico *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, por isso, não precisa manter um estoque com todas estas lixas, basta optar por uma apenas, que o valor médio da rugosidade será em torno de $5,09 \pm 1,21 \mu\text{m}$, cuja variação do valor é devido a questões anatômicas da madeira.
- Ambas as madeiras termorretificadas apresentaram dois valores de potência dissipada, para a lixa de 100 *mesh* e as demais consideradas mais finas 120, 150 e 220 *mesh*. A potência média do *Corymbia citriodora* para as lixas finas foi em torno de $459,94 \pm 33,83 \text{ W}$ e de 100 *mesh* de $841,09 \pm 57,05 \text{ W}$. O *Pinus elliotti* para as lixas finas próximo de $502,71 \pm 39,39$ e de 100 *mesh* $636 \pm 185,54$. A variação do valor da potência ocorreu devido as questões anatômicas da madeira em especial o *Pinus elliotti* que apresentou um nó quando processado pela lixa de 100 *mesh* proporcionando por isso o maior desvio padrão e pela granulometria da lixa, porque a lixa de 100 *mesh* obteve maior valor da potência em relação as lixas finas.



- O *P. elliotti* não apresentou relação significativa com as lixas 100, 120, 150 e 220 *mesh* e a potência dissipada no sistema foi de $536,04 \pm 13,27$.
- O *Corymbia citriodora* diferenciou a potência em dois valores, de 100 *mesh* e das lixas consideradas finas 120,150 e 220 *mesh*. O processamento com madeira de 100 *mesh* dissipa potência próximo de $782,36 \pm 72,86$ W e as lixas finas $483,74 \pm 29,23$ W cuja variação ocorreu devido a questões anatômicas da madeira.

_____ Sugestões para futuros trabalhos.

- Aplicar o método de Taguchi antes para então definir os fatores presentes no planejamento experimental.
- Utilizar a colorimetria analítica como instrumento para a obtenção dos valores cromáticos das madeiras termorretificadas, afim de determinar com maior precisão a cor da madeira.
- Criar uma tabela de consulta de lixas indicando o tipo de lixa quanto a granulometria e grão abrasivo em relação a espécie de madeira processada incluindo as termorretificadas com a descrição da temperatura de tratamento e cor.
- Aplicação de lixas com maior variação de granulometria, incluindo principalmente as de menor *mesh* e com diferentes grãos abrasivos.
- Analisar a relação da densidade da madeira com o resultado da rugosidade e potência de lixamento.
- Variar fatores de entrada referentes ao maquinário como força, pressão, velocidade em relação aos parâmetros rugosidade e vibração.
- Variar os tipos de madeira, pois este fator mostrou ser um dos que mais influenciam na rugosidade e potência de lixamento.



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

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

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14960 (2003). “Abrasivos - Lixas - Requisitos de segurança para seu uso”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

A. D. L. HUMPHRIS, M. J. Miles; HOBBS, J. K. A mechanical microscope : High-speed atomic force microscopy. *APPLIED PHYSICS LETTERS*, v. 86, n. December 2004, p. 2003–2006, 2005.

A.MERTOL, Application of the Taguchi method on the robust design of molded 225 plastic ball grid array packages[J]. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 18(4), 734–743 (1995)

ANDERSEN, NATALIJA. Enzymatic hydrolysis of cellulose experimental and modeling studies. *Ph.D. Thesis -BioCentrum-DTU TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK*, p. 154, 2007.

ARAUJO, HENRIQUE JOSÉ BORGES; MAGALHÃES, WASHINGTON LUIZ ESTEVES; OLIVEIRA, LUÍS CLÁUDIO. Durabilidade de madeira de *eucalypto citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. *ACTA AMAZONICA*, v. 42, n. 068, p. 49–58, 2005.

ARAUJO, V. *et al.* Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 37, n. 90, p. 189, 2017.

ARNT, ÂNGELA BEATRIZ COELHO. Resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos cerâmicos aplicados por aspersão térmica. *Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM*, p. 125, 1999.

ARSALAN, M. *et al.* An innovative approach for planning and execution of pre-experimental runs for Design of Experiments. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, v. 22, n. 3, p. 155–161, 2016.

BAAS, PIETER *et al.* Evolution of xylem physiology. Elsevier Ltd, p. 273–295, 2004.



BALLONI, CARLOS JOSÉ VESPÚCIO. Caracterização Física e Química da Madeira de *Pinus Elliottii*. Trabalho de Graduação - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, curso de Engenharia Industrial Madeireira., p. 42, 2009.

BATCHELOR WARREN J, CONN ANDERREW B, BARKER IAN H. Measuring the fibril angle of fibres using confocal microscopy. *Appita J* 1997;50:377–80.

BATISTA, DJEISON CESAR; TOMASELLI, IVAN; KLITZKE, RICARDO JORGE. Efeito do tempo e da temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Ciência Florestal, Santa Maria*, v. 21, p. 533–540, 2011.

BEALL, F. C.; EICKNER, H.W. Thermal degradation of wood components: A review of the literature. *U.S.D.a. Forest Service Research Paper*, n. May, p. 26, 1970.

BELEZIA, CAMILO ARAÚJO. Efeito da retificação térmica nas características e propriedades físicas de madeira *Pinus elliottii*. *Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Itapeva*, p. 37, 2005.

BELEZIA, CAMILO ARAÚJO. Efeito da retificação térmica nas características e propriedades físicas de madeira *Pinus elliottii*. *Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Itapeva*, p. 37, 2005.

BELT, TIINA *et al.* Industrial Crops & Products Cellular level distributions of Scots pine heartwood and knot heartwood extractives revealed by Raman spectroscopy imaging. *Industrial Crops & Products*, v. 108, n. April, p. 327–335, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.056>>.

BIANCHI, C. E., SILVA, E. J., LOVATO, M. C., FERNANDES, O. C., VALARELLI, I. D. Características e tendências do processo de abrasão. *Revista Máquinas & Metais*. Aranda Editora. Ano XXXV, nº 399. p. 238-249. Abril. 1999.

BIANCHI, E C *et al.* Influência da dureza dos discos abrasivos no corte de materiais dúcteis. *Revista Matéria*, v. 11, n. 1517–7076, p. 24–29, 2006. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10673>>.

BROWNE, F. L. Theories of combustion of wood and its control. *FOREST PRODUCTS LABORATORY*, n. December, 1955.

CALONEGO, F. W. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. 2009. 163f. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu.



CAMARGOS, JOSÉ ARLETE A.; GONÇALEZ, JOAQUIM C. A Colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. *brasil florestal*, v. n° 71, p. 30–41, 2001.

CANARIM, RUBENS CHINALI. Influência da friabilidade dos grãos abrasivos de rebolos de CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340. *Tese (Doutorado)–Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru*, p. 54, 2018.

CARVALHO, WALTER *et al.* Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. *Quim. Nova*, v. 32, n. 8, p. 2191–2195, 2009.

CEPRA. Lixas e Processos de Lixagem. Manual Técnico de Formador, v. Edição 1.0, 2005.

CHIEN, YI-CHI *et al.* Effects of heat treatment on the chemical compositions and thermal decomposition kinetics of Japanese cedar and beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, v. 158, p. 220–227, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.11.003>>.

COOL, J., HERNÁNDEZ, R. E. (2011). “Improving the sanding process of black spruce wood for surface quality and water-based coating adhesion,” *Forest Products Journal* 61(5), 372–380. DOI: 10.13073/0015-7473-61.5.372.

CREBER, G. T.; CHALONER, W. G. Influence of Environmental Factors on the Wood Structure of Living and Fossil Trees. Botany Department, Bedford College, University of London, Regent’s Park, NW1 4NS Great Britain, v. 50, p. 357–448, 1984.

D’YAKONOV, A. (2014). “Effective cutting conditions in abrasive machining,” *Russian Engineering Research* 34(12), 778–780. DOI: 10.3103/S1068798X14120090.

DATE, S. W., AND MALKIN, S. (1976). “Effects of grit size on abrasion with coated abrasives,” *Wear* 40, 223–235.

DELUCIS, RAFAEL DE AVILA *et al.* Propriedades físicas da madeira termorretificada de quatro folhosas. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 1, p. 99–107, 2014.

DENES, L., LANG, E. M., & KOVACS, Z. Product development from veneer-mill residues: An application of the Taguchi's method. *Wood and Fiber Science*, 38(1), 36–48, 2006.

DESCH, H. E.; DINWOODIE, J. M. Timber-its structure, properties and utilisation. 6. ed. London: McMillan, 1993. 410 p.

DICKINSON, GEOFFREY R.; WALLACE, HELEN M.; LEE, DAVID J. Reciprocal and advanced generation hybrids between *Corymbia citriodora* and *C. torelliana* : forestry breeding and the risk of gene flow. *Forest Science*, p. 1–10, 2013.



DIETENBERGER, M.A.; HASBURGH, L.E. *Wood Products: Thermal Degradation and Fire*. Elsevier Ltd., 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03338-5>>.

DÖLL-BOSCARDIN, P. M. *et al.* Artigo Anatomia foliar de *Corymbia calophylla* (Lindl.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson,. Brazilian Journal of Pharmacognosy, v. 20, n. December 2008, p. 361–367, 2010.

ENCINAS, J.I., DA SILVA, G.F., PINTO, J.R.R. Idade e crescimento das árvores. Comunicações Técnicas Florestais Universidade de Brasília-Faculdade de Tecnologia-Departamento de Engenharia Florestal, v. 7, n. 1, p. 47, 2005. Disponível em:<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10018/1/LIVRO_IdadeCrescimentodasArvores.pdf>.

ESTEVES, B. M., DOMINGOS, I. J., AND PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air Bruno. BioResources, Raleigh, v. 3, p. 142–154, 2008.

ESTEVES, BRUNO M.; PEREIRA, HELENA M. Wood modification by heat treatment: A review. BioResources, v. 4, n. 1, p. 370–404, 2009.

Estudo Setorial. Associação Paranaense de Empresa.pdf>.de Base Florestal (APRE), p. 73, 2018. Disponível em: <http://www.apreflorestas.com.br/wp-content/uploads/2018/02/Estudo-Setorial-2018_APRE>

FIGUEROA, MANUEL JESÚS MANRIQUEZ; MORAES, POLIANA DIAS . Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157–174, 2009.

FONSECA, M. A. Análise do Processo de Lixamento na madeira de *Pinus elliottii* e Eucalipto Saligna. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

FOTIN, A. *et al.* Experimental research concerning the power consumption during the sanding process of birch wood. Internacional conference of scientific paper afases Brasov, 26-28 May, 2011

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

FOX, T. R.; JOKELA, E. J.; ALLEN, H. L. The Development of Pine Plantation Silviculture in the Southern United States. n. November, p. 337–347, 2007.

GAFFⁱ, MILAN; SIKORA, ADAM. Color and Chemical Changes in Teak (*Tectona grandis* L. f.) and Meranti (*Shorea* spp.) Wood after Thermal Treatment. *bioresources*, v. 14, p. 2667–2683, 2019.



GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. Secagem racional da madeira. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

GHOSH, S.; CHOWDHURY, S. CV, ECV, and Robust CV Designs for Replications under a Class of Linear Models in Factorial Experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2017.

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, FABRÍCIO GOMES *et al.* Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 33, p. 501–509, 2009.

GOTTLÖBER C(2014) Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen: Grundlagen – Systematik – Modellierung – Prozessgestaltung. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München. ISBN 978-3-446-44058-6, E-Book-ISBN 978-3-446-44003-6.

GU, F., HALL, P., MILES, N.J., DING, Q.W., WU, T., 2014: Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis. *Material & Design* 62: 189-198

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

HAIR, F.J. *et al.*. Análise multivariada de dados. 6a ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAN S *et al.* (2017) Enhancement of Prediction Accuracy for Home Sales Index Prediction Model based on Integration of Multiple Regression Analysis and Genetic Algorithm. v. 0, n. 0, p. 1–8.

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.

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:

HUA, SENG *et al.* Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. *Construction and Building Materials*, v. 181, p. 408–419, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058>>.



HUANG, C. L. *et al.* Cell wall structure and wood properties determined by acoustics - A selective review. *Holz als Roh - und Werkstoff*, v. 61, n. 5, p. 321–335, 2003.

HUNT, DAVID. Properties of wood in the conservation of historical wooden artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, v. 13, n. 3, p. S10–S15, set. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBA: Indústria Brasileira de Árvores. Brasília, DF, 2016. 96 p. Relatório Ibá 2016. Krüger.

JACKSON, M J *et al.* Chapter 2 Tribology of Machining. *Springer*, p. 198, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31683-8.

JACKSON, M. J., HITCHINER, M. P. Abrasive Tools and Bonding Systems. In: Jackson, M. J. E Davim, J.P., *Machining with abrasives*, pp. 1-77, 2011.

JEMIELNIAK, K. Commercial Tool Condition Monitoring Systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 15, p. 711-721. 1999

KARABAS, H. Biodiesel production from crude acorn (*Quercus frainetto* L.) kernel oil: An optimisation process using the Taguchi method. *Renewable Energy*, v. 53, p. 384–388, maio 2013.

KE, Q., LIN, L., CHEN, S., ZHANG, F., & ZHANG, Y. Optimization of L-shaped corner dowel joint in pine using finite element analysis with Taguchi method. *Wood Research*, 61(2), 243-254, 2016.

KLINGSPOR -Tecnologia de abrasivos - Tipos de grãos. Disponível em: <<https://www.klingspor.de/pt-br/informacoes-sobre-lixamento/tipos-de-graos> > Acesso em: 06 mar. 2019.

KLOCK, UMBERTO *et al.* Química da madeira. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal – Setor de Ciências Agrárias – da Universidade Federal do Paraná, v. (3a. Edição, p. 71, 2005. Disponível em: <<http://marioloureiro.net/ciencia/biomass/quimicadamadeira.pdf>>.

KLOCKE, F. *Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping*. Ed. Springer, p. 433, 2009.

KOSHIN, A. A., CHAPLYGIN, B. A., AND ISAKOV, D. V. (2011). “The design of abrasive machining operations,” *Russian Engineering Research* 31(9), 864–866. DOI: 10.3103/S1068798X11090152

KRAJNC, LUKA; FARRELLY, NIAL; HARTE, ANNETTE M. The influence of crown and stem characteristics on timber quality in softwoods. *Forest Ecology and Management*, v. 435, p. 8–17, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.043>>.



LANG, E. M. product development from veneer-mill residues : an application of the Taguchi ' s method levente denes. 2004.

LEE DJ, HUTH JR, BRAWNER JT, DICKINSON GR (2009) Comparative performance of *Corymbia* hybrids and parental open-pollinated families in subtropical Queensland. *Silv Genet* 58:205–212

LEITE, *et al.* Experimental investigation of parameters impacting the roughness of *Pinus elliottii* Wood. *BioResources*, v. 14, n. 2015, p. 2051–2061, 2019.

LEITE, S.S. Comportamento do processo de lixamento de madeiras de reflorestamento. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

LEITE, SUELI SOUZA *et al.* com Analysis of the Parameters Affecting the Surface Sanding of *Pinus elliottii* and *Corymbia citriodora* Wood Species. *BioResources*, v. 14, n. 2, p. 2773–2783, 2019.

LEITE, SUELI SOUZA. Avaliação de desempenho no processo de lixamento de madeiras das espécies *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru*, p. 86, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103752/tiburcio_ufo_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

LEITE, SUELI SOUZA. Lixamento do *Pinus elliottii* com carbeto de silício e óxido de alumínio. *Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Itapeva*, p. 91, 2013.

LONGUE JUNIOR, D.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade de reflorestamento para produtos florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, n.76, p. 429-438, 2013. DOI: 10.4336/2013.pfb.33.76.528.

LUZ, ANA LUÍSA. Análise da formação dos anéis de crescimento anual das árvores ao longo dum ciclo de actividade cambial. *Dissertação (Mestrado Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) – Universidade Técnica de Lisboa*, n. 101, 2011.

MACHADO, Alisson Rocha *et al.*, Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, 2009.

MAHR (Germany). Perthometer: Surface Texture Parameters. Disponível em: <<http://www.universalmeasurement.com/MahrFederalFinish.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

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



MARÇAL, Rafael A., SANTOS, Ronaldo L.. Medição, Análise e Controle de Vibração em máquinas industriais: Estudo de caso em uma empresa de grande porte do setor madeireiro. 2013. 64 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Automação Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

MARCHI, ENRICO *et al.* Science of the Total Environment Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of the Total Environment*, v. 634, p. 1385–1397, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>>.

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

MARTÍNEZ, JAVIER DAVID ANGARITA. Modelagem cinética da hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar pré-tratada hidrotermicamente. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro., p. 96, 2014.

MARTINS, M. Pisos de *Eucalyptus clœziana* F . Muell , *Eucalyptus microcorys* F . Muell E *Corymbia maculata* Hook. 2008 .

MARTINS, SÉRGIO FILIPE MENDES FERREIRA. Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico . Aplicação em Caso de Estudo. p. 244, 2009

MATTOS, B. D. *et al.* Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, v. 6, n. 1, p. 121–126, 31 mar. 2011.

MATTOS, PATRÍCIA PÓVOA. Identificação de anéis anuais de crescimento e estimativa de idade e incremento anual em diâmetro de espécies nativas do Pantanal da Nhecolândia, MS. *Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná*, p. 128, 1999.

MENCUCCINI, M; NIKINMAA, E; HOLTITA, T. Linking phloem function to structure : Analysis with a coupled xylem – phloem transport model. *Journal of Theoretical Biology*, v. 259, p. 325–337, 2009.

MENEZES, *et al.* Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. *Ciência Rural*, v. 44, n. 0103-8478, p. 1019–1024, 2014.

MERRY, FRANK *et al.* Balancing Conservation and Economic Sustainability : The Future of the Amazon Timber Industry. *Environmental Management*, p. 395–407, 2009.

MICHAEL H. RAMAGEA *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. *Journal of Power Sources*, v. 274, n. October 2016, p. 990–1004, 2015.



MISSIO, ANDRÉ L. *et al.* Thermochemical and physical properties of two fast-growing eucalypt woods subjected to two-step freeze-heat treatments. *Thermochimica Acta*, v. 615, p. 15–22, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2015.07.005>>.

MODES, KARINA SOARES. Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, p. 99, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5264>>.

MODES, KARINA SOARES; SANTINI, ELIO JOSÉ ;VIVIAN, MAGNOS ALAN Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. *Ciência Florestal, Santa Maria*, v. 27, p. 291–302, 2017.

MONTGOMERY, D. C. *et al.* Using statistically designed experiments for process development and improvement : an application in electronics manufacturing. v. 16, p. 55–63, 2000.

MOORE, M. A. Abrasive wear, In: Fundamentals of friction and wear of materials, Pittsburgh, PA, 1980, Proceedings. Rigney, D. A., ed., ASM, p. 73-118

MOORE, M. A.; KING, F. S. Abrasive wear of brittle solids, *Wear*, v. 60, p. 123-40, 1980.

MORESCHI, JOÃO CARLOS. Propriedades da madeira de *setor de ciências agrárias da ufpr centro de ciências florestais e da madeira departamento de engenharia e tecnologia florestal*, p. 194, 2012.

MORI, CLÁUDIA LOPES SELVATI DE OLIVEIRA *et al.* Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. *Cerne*, v. 11, n. 2, p. 137–146, 2005.

MORI, CLÁUDIA LOPES SELVATI DE OLIVEIRA *et al.* Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. *ciência florestal, santa maria*, v. 14, p. 123–132, 2004.

MOURA, L. F., COOL, J., HERNÁNDEZ, R. E. (2010). “Anatomical evaluation of wood surfaces produced by oblique cutting and face milling,” *IAWA Journal* 31(1), 77-88. DOI: 10.1163/22941932-90000007.

MOURA, LUIZ FERNANDO DE; BRITO, JOSÉ OTÁVIO; JÚNIOR, GERALDO BORTOLETTO. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus Grandis* E *Pinus Caribaea* VAR. *Hondurensis*. *Revista FLORESTA*, V. 42, P. 305–314, 2011.

MYŚKOW, ELŻBIETA *et al.* The effect of pollutant fog deposition on the wood anatomy of subalpine Norway spruce. *European Journal of Forest Research*, n. 0123456789, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10342-018-01160-4>>.



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

NEJAD, MOJGAN *et al.* Coating performance on oil-heat treated wood for flooring. *BioResources*, v. 8, n. 2, p. 1881–1892, 2013.

NORTON - Site Institucional da Empresa Norton Abrasivos, em: <<http://www.norton-abrasivos.com.br/produtos>>. Acesso em: 22 mai. 2012.

NUNES, CINTIA SILVA. Estabilidade dimensional e modificações químicas da madeira termorretificada de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson. *monografia Curso de Engenharia Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.*, p. 32, 2009

NUSSBAUM, G. Ch. Rebolos & abrasivos: tecnologia básica. Livro. Editora Ícone. São Paulo. 1986.

OKAJOVÁ, A. 1999: Sanding process in the dependence on wood grain direction. In : referátov z 2. MVK „Stroj-nástroj-obrobok 1999“, Nitra, 88-93.

ORS Y, BAYKAN I. The effect of planing and sanding on surface roughness of massive wood. *Tr J Agric For* 1999.

PACE, J. H. C. Avaliação do acabamento superficial na madeira de *Corymbia citriodora* (HOOK) E *Khaya ivorensis* A. Chev. 2013.

PAWLEY, JAMES. The Development of Field-Emission Scanning Electron Microscopy for Imaging Biological Surfaces. *SCANNING*, v. 19, p. 324–336, 1997.

PERTUZZATTI, A. *et al.* Propriedades físicas da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* termorretificada sob diferentes atmosferas. *Revista Ciência da Madeira - Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 7, n. 1, p. 7–15, 2016. Disponível em: <<http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1839-rcm/v07n01/19059-propriedades-fisicas-da-madeira-de-pinus-elliottii-var-elliottii-termorretificada-sob-diferentes-atmosferas.html>>.

PERTUZZATTI, ANDERSON *et al.* Effect of process parameters in the thermomechanical densification of *Pinus elliottii* and *eucalyptus grandis* fast-growing wood. *BioResources*, v. 13, n. 1, p. 1576–1590, 2018.

PINHO, M. da S. *et al.* Efetividade de um coxim de cabina do trator agrícola na atenuação das vibrações. *Revista Ciência Agronômica, SciELO Brasil*, v. 45, n. 3, p. 461–468, 2014.

PINTAÚDE, GIUSEPPE. Análise dos Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo utilizando Ensaio Instrumentados de Dureza. *Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.*, p. 200, 2002.



PLOMION, CHRISTOPHE; LEPROVOST, GRÉGOIRE; STOKES, ALEXIA. Wood Formation in Trees Wood. *Plant physiology*, v. 127, n. December, p. 1513–1523, 2001.

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.

QUOIRIN, NILTON. Anatomia e fisiologia da madeira. . Disponível em: <<http://www.oocities.org/tomografiademadeira/madeira.html> > Acesso em: 10 de fevereiro de 2019

RATNASINGAM, J.; REID, H. F.; PERKINS, M. C. “The abrasive sanding of Rubberwood (*Hevea brasiliensis*): An industrial perspective,” *Holz als Roh - und Werkstoff* 60(3), 191–196. DOI: 10.1007/s00107-002-0285-1. v. 60, p. 191–196, 2002.

REIS, C. A. F. *et al.* *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa - Embrapa, 2013.

REMADE, 2018 Conheça melhor como é a madeira antes de se tornar madeira. <https://blog.fastformat.co/como-fazer-citacao-de-artigos-online-e-sites-da-internet/> Acesso em: 8 fev. 2019

REPUBLIC, SLOVAK *et al.* Effect of thermal modification on the colour changes of oak wood. *wood research*, v. 60, n. 3, p. 385–396, 2015.

RIBEIRO, ALESSANDRA DE OLIVEIRA *et al.* Retratibilidade da madeira de *toona ciliata m. roem* proveniente de três municípios do sul de minas gerais. *CERNE*, v. 20, p. 351–361, 2014.

SADEGHI, S. H. *et al.* Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method. *Journal of Hydrology*, v. 448-449, p. 174–180, 2012.

SALCA, EMILIA-ADELA; BRASOV, Universitatea Transilvania. Optimization of the cutting schedule during sanding. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, v. 21, n. January, 2018.

SALONI, D. E., LEMASTER, R. L., AND JACKSON, S. D. (2005). “Abrasive machining process characterization on material removal rate, final surface texture, and power consumption for wood,” *Forest Prod. J.* 55(12), 35-52.

SAMOLEJ, A. Influence of specific pressure on cutting power and wood removal by disc sander. Original scientific paper • *Izvorni znanstveni rad*, v. 57, n. 1, p. 5–11, 2006.

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



SANTOS, ANANIAS FRANCISCO DIAS JÚNIOR PABLO VIEIRA DOS; CARVALHO, JOSÉ HENRIQUE CAMARGO PACE ALEXANDRE MONTEIRO DE; LATORRACA, JOÃO VICENTE FIGUEIREDO. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais para uso em movelaria. *Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.), Pelotas*, v. 4, p. 93–107, 2013.

SANTOS, JOSÉ ANTÔNIO. Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira. (TESE DE DOUTORADO) DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE DO MINHO, p. 273, 2007.

SANTOS, S. N. C. Análise estrutural e de superfície de madeiras submetidas a tratamento térmico e degradadas pelo fungo *Pycnoporus sanguineus*. 2015. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SAVADAMUTHU, L.; MUTHU, S.; VIVEKANANDAN, P. Quality Improvement in Turning Process using Taguchi 's Loss Function. n. 4, p. 202–205, 2011.

SCHAFFER, E. L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dry Douglas fir. *Journal of Testing and Ealuation*, v. 1, n. 4, p. 319-329, 1973.

SCHLOSSER, J. F. Tratores Agrícolas. Santa Maria: UFSM, Departamento de Engenharia Rural, 2001.

SEHLSTEDT-PERSSON, M. Colour Responses To Heat-Treatment Of Extractives And Sap From Pine And Spruce. *8th International IUFRO Wood Drying Conference - 2003 Colour*, n. 1997, p. 459–464, 2003

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Ministério do Meio Ambiente. Produtos madeireiros e não madeireiros. Brasília, DF: 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustent%C3%A1vel/produtos-madeireiros-e-n%C3%A3o-madeireiros>>. Acesso em: 28 dez. 2018

SERVIDONI, ANA PAULA DA SILVA. Análise de porosidade e o potencial como rocha reservatório em estromatólito do recente da lagoa salgada. Dissertação Mestre em Geologia Exploratória, no curso de Programa de Pós Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná., p. 141, 2012.

SEVERO, ELIAS TAYLOR DURGANTE. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunni*. *Ciência Florestal, Santa Maria*, v. 10, p. 109–124, 2009.

SIKLIENKA, M. 2001: The influence of specific pressure on cutting force per unit area of during cut of wood. In. *Kształtowanie materialow niemetalowych. Zbiór prac 4 Konferencji Naukovo – Technicznej. Zakopane*, 267 – 273.

SIKLIENKA, M. 2001: The influence of specific pressure on cutting force per unit area of during cut of wood. In. *Kształtowanie materialow niemetalowych. Zbiór prac 4 Konferencji Naukovo – Technicznej. Zakopane*, 267 – 273.



SILVA, *et al.* Strength and Stiffness of Thermally Rectified Eucalyptus Wood Under Compression. *Materials Research*, v. 16, n. 5, p. 1077–1083, 2013.

SILVA, KELLY CRISTINA RAMOS; MOLINA, JULIO CESAR. Efeito da termorreificação nas propriedades de resistência e de rigidez da madeira Eucalypto citriodora. *Revista MADEIRA Arquitetura & Engenharia*, p. 53–68, 2012.

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

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

SUNDQVIST, BROR. Colour Changes and Acid Formation in Wood During Heating. Skellefteå Campus Division of Wood Material Science, p. 1402–1544, 2004.

TAYLOR, ADAM M; GARTNER, BARBARA L; MORREL, JEFFREY I. Heartwood formation and natural durability- a review. *wood and fiber science*, n. larson 1962, 2002.

TAYLOR, JAMES B.; CARRANO, ANDRES L.; LEMASTER, RICHARD L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. *Solid Wood Products*, v. 49, n. May, p. 41–46, 1999.

THOMAS, M.; SINHA, B. K. Towards an Optimum Optimum Test for Non-additivity in Tukey 's Model. *journal of multivariate analysis*, v. 94, p. 68–94, 1991.

TIBURCIO, U. F. D. O. Medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalypto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento. 2009

TIRYAKI, S., MALKOÇOĞLU, A., AND ÖZŞAHIN, S. (2014). “Using artificial neural networks for modeling surface roughness of wood in machining process,” *Construction and Building Materials* 66, 329-335. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.098.

TRIANOSKI, ROSILANI *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de Pinus tropicais. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, v. 42, n. 101, p. 21–28, 2014.

UGULINO, B., AND HERNÁNDEZ, R. E. (2018). “Analysis of sanding parameters on surface properties and coating performance of red oak wood,” *Wood Mater. Sci. Eng.* 13(2), 64-72. DOI: 10.1080/17480272.2016.1266511.

ULISSES FRAZÃO DE OLIVEIRA TIBURCIO. Medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalypto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento. *Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá*, 2009., p. 101, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103752/tiburcio_ufo_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.



UNSAL, O; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. *Journal Wood Science*, Tóquio, v.51, n.4, p.405-409, 2005

VALENÇA, ANTONIO CARLOS DE VASCONCELOS; PAMPLONA, LEONARDO DE MOURA PERDIGÃO; SOUTO, SABRINA WEBER. Os novos desafios para a indústria moveleira no Brasil. BNDES setorial, Rio de Janeiro, v. 15, p. 83–96, 2002.

Varanda, L. D., Alves, M. C. de S., Gonçalves, M. T. T., & SANTIAGO, L. F. F. A influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis* (pp. 23–32). pp. 23–32. 2010

VARASQUIM, FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA. Efeitos da granulometria, do desgaste e do material abrasivo no lixamento plano de madeiras. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014., p. 162p, 2014.

XAVIOR, M. A., MANOHAR, M., PATIL, M. M., AND JEYAPANDIARAJAN, P. (2017). “Investigation of surface integrity during turning Inconel 718,” *T. Can. Soc. Mech. Eng.* 41(3), 387- 394. DOI: 10.1139/tcsme-2017-1027

YANG, C.-L. Optimizing the Glass Fiber Cutting Process Using the Taguchi Methods and Grey Relational Analysis. *New Journal of Glass and Ceramics*, v. 01, n. April, p. 13–19, 2011

ZHANG, JING *et al.* The formation of wood and its control. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 17, n. 1, p. 56–63, 2014.

ZHANG, L.; SUN, L. Wettability optimization analysis of lead-free solders with Taguchi method. 2015

ZHANG, L.; SUN, L. Wettability optimization analysis of lead-free solders with Taguchi method. 2015.

ZUIDEMA, PIETER A; POULTER, BENJAMIN; FRANK, DAVID C. A Wood Biology Agenda to Support Global Vegetation Modelling. *Trends in Plant Science*, v. 23, n. 11, p. 1006–1015, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.003>>.
